

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra výrobních strojů a konstruování**

**Využití vibrodiagnostického měření pro diagnostiku zařízení  
pro úpravu a zpracování vápence.**

**Application of Vibrodiagnostic Measurement for Diagnostics  
of Limestone Treatment and Processing Equipment.**

**Student:**  
**Vedoucí práce:**

**Jakub Bedry**  
**Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra výrobních strojů a konstruování

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Bedry**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2301R023 Technická diagnostika, opravy a udržování  
Téma: **Využití vibrodiagnostického měření pro diagnostiku zařízení pro úpravu  
a zpracování vápence.**  
**Application of Vibrodiagnostic Measurement for Diagnostics of  
Limestone Treatment and Processing Equipment**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Poruchy strojních zařízení jsou velmi často zapříčiněny poškozením ložisek, proto je třeba sledovat jejich technický stav a včas odhalit vznikající poškození. Zabývejte se proto metodami pro sledování technického stavu ložisek, ale i celých strojních celků, jejich možnosti uplatnění a vhodnost použití, proveďte potřebná měření a závěrečné srovnání dosažených výsledků.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte konkrétní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce.

Rozsah práce min. 35 stran textu.

Seznam doporučené odborné literatury:

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 1.vydání, 408s., ISBN 80-7300-157-6

KREIDL, M. a kol.: *Diagnosticke systémy*. ČVUT v Praze, Praha 2001, 352 s., ISBN 80-01-02349-4

BLATA, J. – Juraszek, J. *Metody technické diagnostiky, teorie a praxe. Metody diagnostyki technicznej, teoria i praktyka*. Ostrava: REPRONIS, s.r.o., 2013, 133 stran, ISBN 978-80-248-2997-5

Podkladové materiály - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

ČSN 20 0065 *Metody měření a hodnocení mechanického kmitání - Mezní hodnoty kmitání*. Praha: Český normalizační institut, červen 1992. 16 s.

#### *Interní podkladové materiály*

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



doc. Ing. Jiří Fries, Ph.D.  
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty



## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 16. května 2020

  
.....  
podpis studenta

## **Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby**

„Souhlasím se zveřejněním této bakalářské dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských/magisterských programech VŠB-TU Ostrava.“

Dne 16. května 2020

  
.....  
podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:  
Adresa trvalého pobytu autora práce:


Jakub Bedry  
Horlí Lhota, Zahumení č.p. 189, 747 64



## Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská\*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby

V Ostravě dne 16. května 2020.



..... Podpis studenta

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

BEDRY, J. Využití vibrodiagnostického měření pro diagnostiku zařízení pro úpravu a zpracování vápence: bakalářská práce. Ostrava: Katedra výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2020, 58s. Vedoucí práce: Ing. Blata, J. Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá diagnostikou vibrací, které generují zařízení pro úpravu a zpracování vápence. Konkrétně se jedná o motory pohánějící ventilátory propojených mezi sebou spojovacím mostem. Teoretická část se zabývá popisem vibrodiagnostiky, snímačů, měřicích míst, mechanickou příčinou vibrací. Praktická část této práce se zabývá přístroji, které byly použity pro měření v provozu Kotouč Štramberk – LB Cemix, s.r.o. Zabývá se vyhodnocováním jednotlivých měření a návrhu řešení. Každé měření je popsáno aby bylo jasné ke kterému zařízení to patří a o co se jedná. Závěr tvoří celkové zhodnocení měření tzn. jednotlivé poruchy a návrh na jejich eliminování, z toho pak určení celkového stavu zařízení.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

BEDRY, J. Application of Vibrodiagnostic Measurement for Diagnostics of Limestone Treatment and Processing Equipment. Bachelor thesis. Ostrava: Department of Production Machines and Design, Faculty of Mechanical Engineering VSB- Technical University of Ostrava, 2020, 58p. Thesis Head: Ing. Blata, J. Ph.D.

This bachelor thesis deals with diagnostics of vibrations, which are generated by machines for treatment and processing of limestone. Specifically, it deals with engines which are propelling the ventilators interconnected with shaft. Theoretical part of this theses describes vibrodiagnostics, sensors, measuring spots and mechanical causes of vibrations. Practical part deals with machines, which were used in service at Kotouč Štramberk – LB Cemix, s.r.o. It evaluates individual measurements and tries to design a solution. Each measurement is described in a way to be clear to which equipment it ties and what is happening. Conclusion consist of total evaluation of measurements, that means of specific failures and how to eliminate them and overall status of said machine.

# Obsah

Úvod .....	- 10 -
1 Teoretický úvod řešené problematiky.....	- 11 -
1.1 Vibrační diagnostika.....	- 11 -
1.1.1 Mechanické kmitání.....	- 11 -
1.1.2 Skládání signálů — FFT .....	- 13 -
1.1.3 Trend měření.....	- 14 -
1.2 Měřicí místa.....	- 14 -
1.3 Snímače vibrací .....	- 15 -
1.3.1 Umístění snímačů .....	- 16 -
1.4 Mechanické příčiny vibrací .....	- 16 -
1.4.1 Nevyváženost.....	- 16 -
1.4.1.1 Statická nevyváženost .....	- 17 -
1.4.1.2 Momentová nevyváženost.....	- 17 -
1.4.1.3 Dynamická nevyváženost.....	- 17 -
1.4.1.4 Vyvažovačky .....	- 18 -
1.4.2 Mechanické uvolnění .....	- 18 -
1.4.3 Rezonance.....	- 18 -
1.4.3.1 Projevy rezonance .....	- 19 -
1.4.3.2 Způsoby potlačení rezonančních kmitů .....	- 19 -
1.4.4 Problémy s ložisky.....	- 19 -
1.4.5 Nesouosost.....	- 20 -
1.4.5.1 Druhy nesouososti.....	- 21 -
1.4.5.2 Ustavení .....	- 22 -
1.5 Termodiagnostika .....	- 23 -
2 Analýza současného stavu motoru .....	- 24 -
2.1 Použité měřicí přístroje.....	- 24 -
2.1.1 Vibrodiagnostika.....	- 24 -
2.1.2 Termodiagnostika .....	- 25 -
2.2 Popis měření .....	- 25 -



2.2.1	Vibrodiagnostika.....	- 25 -
2.2.2	Termodiagnostika .....	- 27 -
2.3	ENVEN 1-4 .....	- 28 -
2.4	EXHAUSTOR 1-4.....	- 38 -
3	Souhrn stavů motorů .....	- 49 -
	Závěr .....	- 50 -
	Poděkování.....	- 51 -
	Použitá literatura .....	I
	Seznam použitých symbolů.....	III
	Seznam použitých zkratek .....	IV
	Seznam použitých cizojazyčných zkratek .....	V
	Seznam obrázků a tabulek .....	VI

# Úvod

Technická diagnostika je nedílnou součástí života strojního zařízení. Z pohledu progresivní údržby je trendem udržet stroj provozuschopný po celou dobu životnosti. S pořád zvětšujícími se nároky na produkci a jakost výrobků je technická diagnostika stále důležitější. Pomocí technické diagnostiky a na jejím základě vhodné údržby je možné podstatně prodloužit životnost strojů. Prodloužení životnosti je výhodné především z ekonomického hlediska. Velkému množství poruch se dá předejít správným ustavením, pravidelnou kontrolou, údržbou a sledováním průběhu trendů v jednotlivých měřících metodách diagnostiky (vibrodiagnostika, termodiagnostika, akustika, atd.)

Moje práce, jak vyplývá z názvu, je zaměřená především na identifikaci a řešení poruch pomocí vibrodiagnostiky. Tato metoda nám slouží k odhalení závad pomocí vibrací, které mohou mít negativní vliv na správný chod strojního zařízení. Každá vibrace má svůj původ a vibrodiagnostika nám je pomáhá správně pochopit a následně vyhodnotit. V mé práci se okrajově zabývám i termodiagnostikou, kterou používám k lepšímu zmapování problematiky.

Mnou měřená a vyhodnocovaná zařízení vychází z reálných hodnot ventilátorů firmy Kotouč Štramberk – LB Cemix, s.r.o. Důvodem měření bylo samovolné odpadávání komínové izolace hluku. Společně s problémovým místem jsem zkontroloval mnoho dalších strojů v komplexu. Tato práce je tedy zaměřena na analýzu současného stavu 8 motorů ventilátorů firmy Kotouč Štramberk – LB Cemix, s.r.o.

# 1 Teoretický úvod řešení problematiky

V této kapitole jsem se zaměřil na teoretický úvod do diagnostiky, zejména pak vibrodiagnostiky. Nastíním zde základní problémy, které mohou být detekovány při měření vibrací stroje.

## 1.1 Vibrační diagnostika

Vibrace je negativní jev, který je nedílnou součástí chodu každého stroje. Vibrace jako takové nejsou závadou, jsou-li v předepsaných mezích tolerance. Monitorování chvění stroje mi slouží jako nástroj, který mi pomáhá při diagnostice stroje. Některé poruchy mají svoje poruchové frekvence nebo se specificky promítají v určitých spektrech vibrací. Vibrační diagnostika (vibrodiagnostika) se tedy zabývá zkoumáním těchto vibrací, a jejich spekter, a na základě toho dokáže určit momentální technický stav stroje.

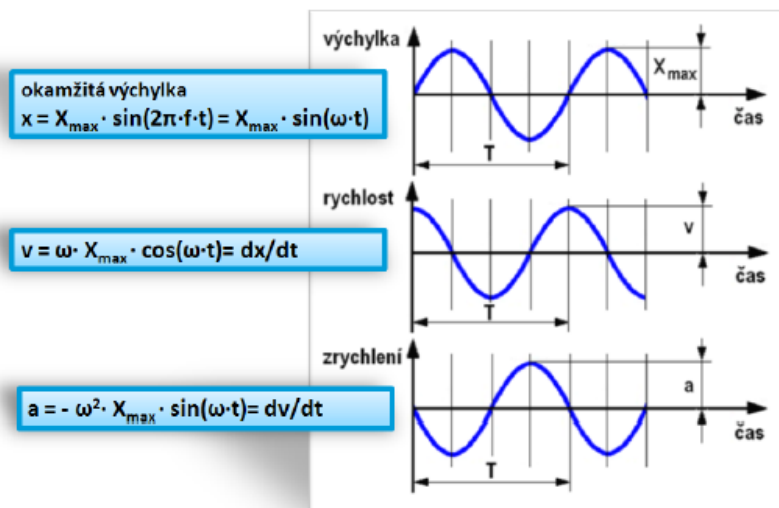
Měření vibrací se provádí za chodu stroje v běžných provozních podmínkách, tzn. Při ustálených hodnotách teploty a při jmenovitých hodnotách (tlak, zatížení, otáčky, napětí, atd.).

- Poruchové frekvence — frekvence vibrací mimo otáčkovou frekvenci. Každý rotující stroj, v dobrém technickém stavu, generuje největší vibrace ve své otáčkové frekvenci. Jsou-li naměřené hodnoty, mimo otáčkovou frekvenci, větší nebo o něco menší než ty na otáčkové frekvenci, pravděpodobně se jedná o poruchu.

- Spektrum vibrací (vibrační spektrum) — obrázek průběhů vibrací stroje.

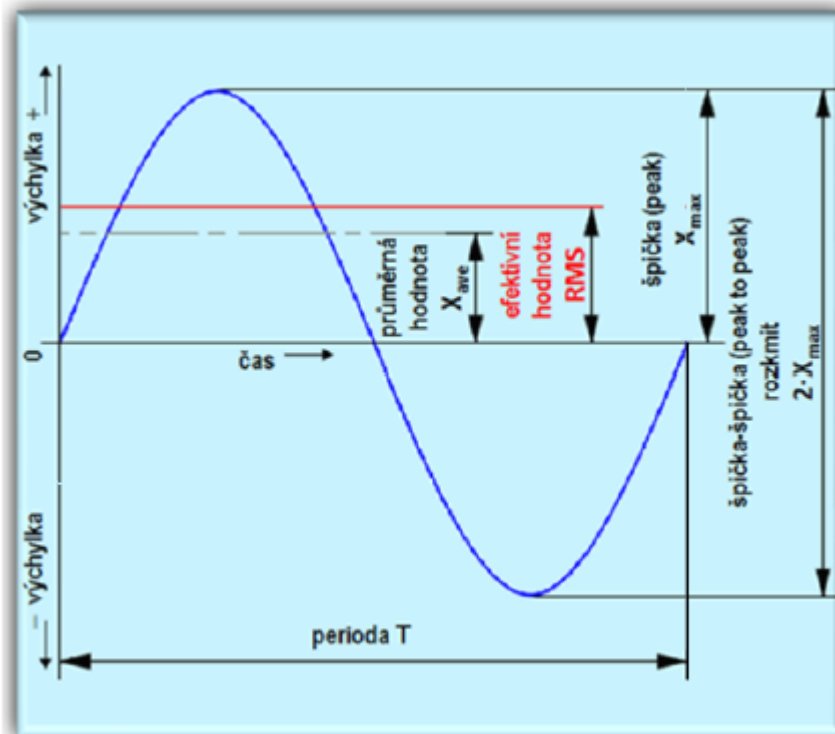
### 1.1.1 Mechanické kmitání

Teorie mechanického kmitání tvoří základ vibrodiagnostiky. Pohyby jednotlivých bodů kmitajícího tělesa lze popsat jako časový průběh jeho okamžité výchylky rychlosti a zrychlení.



Obrázek 1 — Základní vztahové rovnice a časový průběh výchylky, rychlosti a zrychlení[9]

Pro popis i pochopení důležitých pojmů, které se užívají ve vibrační diagnostice, lze použít harmonický časový průběh vibrací. V praxi ovšem téměř nikdy nenarazíme na tento čistý harmonický průběh, většinou jde o složené a náhodné vibrace (šum), které se překrývají a mohou rezonovat. Tento obrázek tudíž slouží pouze k pochopení rovnic a určení základních hodnot výchylky. Při analýze signálu způsobeného vibracemi, se proto věnuje pozornost především velikosti amplitudy a frekvenci výskytu daného jevu.



Obrázek 2 — Harmonický časový signál [9]

•Frekvence (též kmitočet) je fyzikální veličina, která udává počet opakování periodického děje za daný časový úsek.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

**Amplituda** je velikost dynamického pohybu nebo kmitání, která je vyjádřena jako :

1. špička-špička (peak to peak) = rozkmit
2. špička (peak)
3. efektivní hodnota RMS

- Efektivní hodnota **RMS** (Root Mean Square)

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) \cdot dt} \quad (2)$$

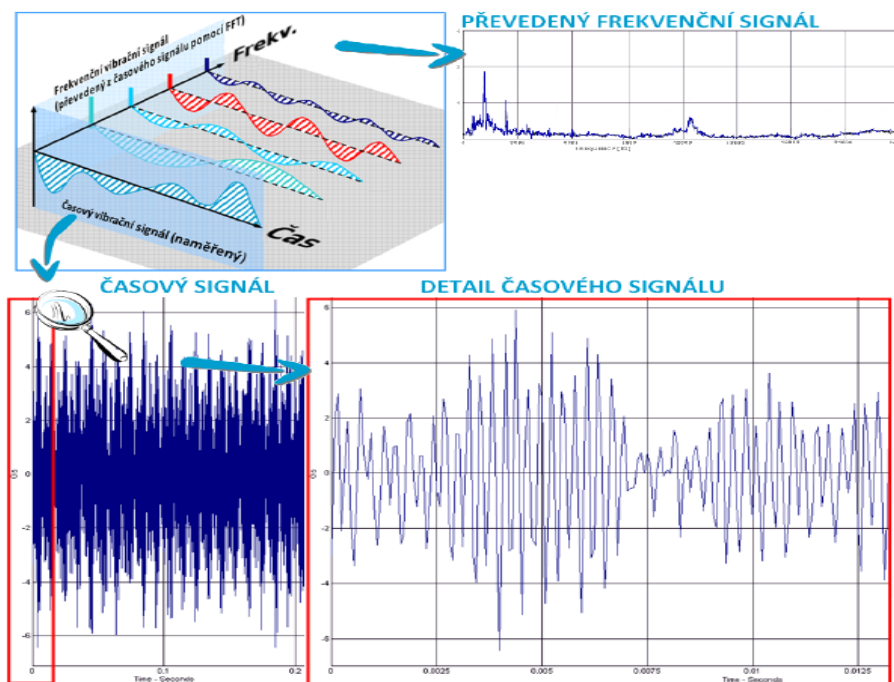
- Průměrná hodnota (**Average**) - průměrnou hodnotu tvoří průměr všech (absolutních) hodnot amplitudy v průběhu periody.

$$x_{\text{ave}} = \frac{1}{T} \int_0^T |x| \cdot dt \quad (3)$$

### 1.1.2 Skládání signálů — FFT

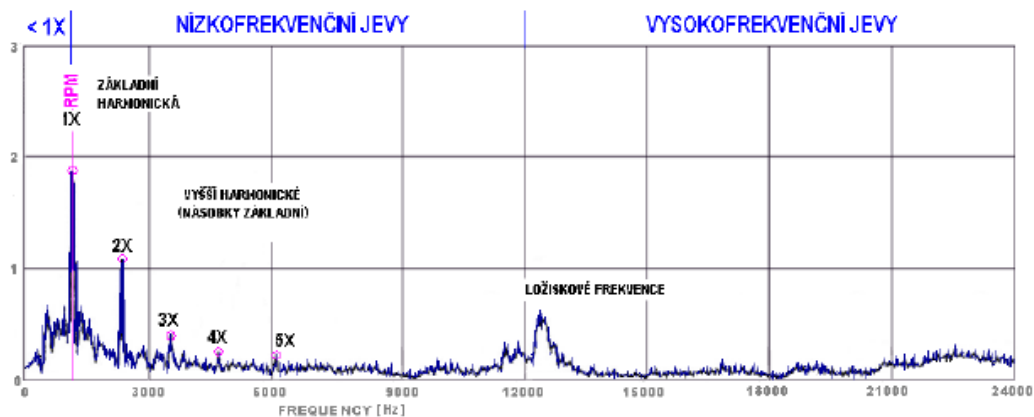
Časový záznam vibrací se skládá ze spousty vibračních signálů generovaných různými součástkami strojního zařízení. Tento záznam bývá z pravidla značně nepřehledný a tudíž je velice obtížné v něm identifikovat jednotlivé projevy poškozených součástí. Abychom byli schopni identifikovat jednotlivé projevy vibrací od různých součástí stroje, např. ložiska, nevyvaha rotoru, ozubení, apod., tak se pro lepší identifikaci používá tzv. **Fourierova transformace - FFT (Fast Fourier Trasformation)**.

FFT se týká hlavně periodicky nebo kvasiperiodicky se opakujících signálů. Počet složek rozkladu je obecně nekonečný, proto FFT rozkládá jen frekvence, které jsou násobky harmonické nebo základní frekvence opakujícího se signálu. Spektrum vibrací tak obsahuje jen izolované složky. Princip toho, jak rozklad signálů funguje je schematicky znázorněn na obrázku.



Obrázek 3 — Transformace signálu [9]

Takto transformovaný signál vibrací je mnohem přehlednější a dokáže poskytnout i hlubší informace o chování a o současném technickém stavu stroje. Transformovaný signál dokáže říct mnohem více o příčinách jednotlivých vibrací.



Obrázek 4 — Frekvenční spektrum zrychlení vibrací [9]

### 1.1.3 Trend měření

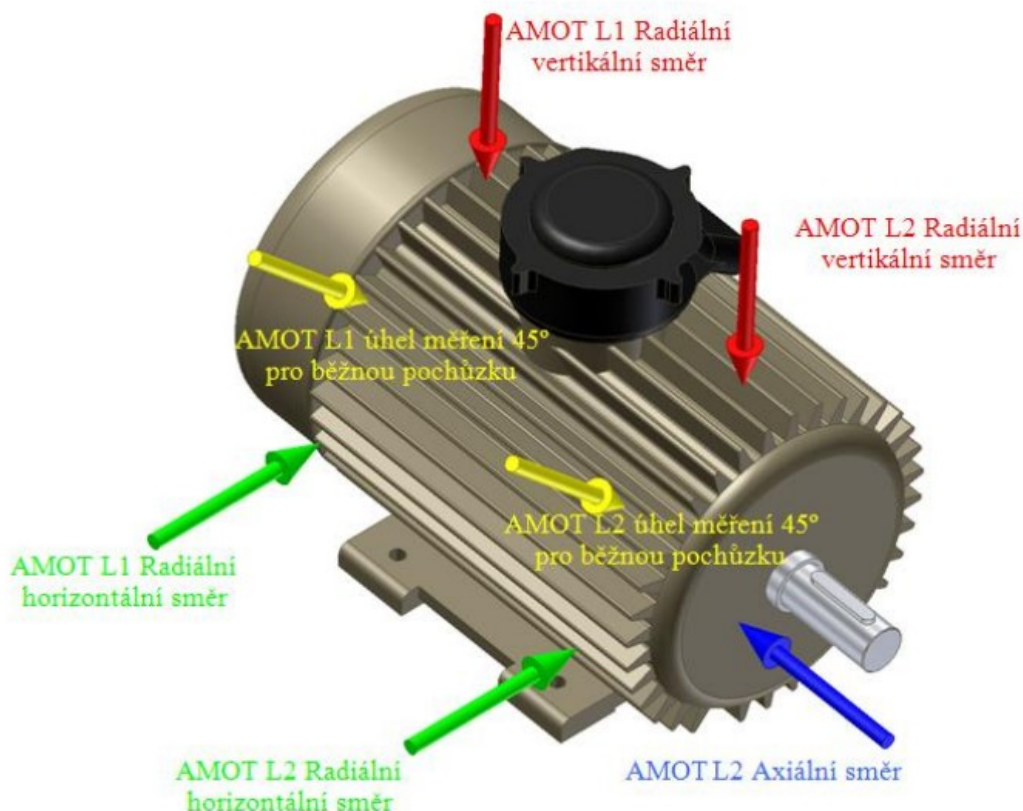
Jedním z nejlepších způsobů jak můžu co nejpřesněji identifikovat co je špatně a jak se bude stav stroje dále vyvíjet je udělat si trend měření. Trend dělám z opakovaných měření v nejlépe stejných časových intervalech. Některé závady se nejlépe určují z trendu měření. Je taky hodně důležité, abych při měření dodržel co možná nejstálější podmínky, do toho spadá třeba dodržování měřících míst, stejné otáčky apod. Trendování může předejít haváriím a odstávkám tím, že se problémy budou řešit včas nebo že na ně budu připravený. Můžu naplánovat odstávky, kontroly, zásahy atd.

## 1.2 Měřicí místa

Aby bylo mé měření co nejdůvěryhodnější, je potřeba abych splnil základní podmínky. Jednou z těchto podmínek je určení nejvhodnějšího místa k umístění snímače na měření vibrací, je potřeba aby jsem vybral takové místo, které bude co nejlépe vyjadřovat skutečnou amplitudu vibrací.

Další ze zásad je umístění snímačů co nejbližší měřenému místu. Měřím ve 3 základních směrech: horizontálním, vertikálním a axiálním. Někdy se také používá měření pod úhlem 45° mezi vertikálním a horizontálním směrem, tohle měření se využívá převážně při pochůzkovým měřeních. Pokud naměřím větší hodnoty vibrací v horizontálním směru, obvykle mě to

upozorňuje na možný problém s nevývahou. V horizontálním směru jsou obvykle největší vibrace, protože stoj je v horizontálním směru poddajnější. V axiálním směru bývají naměřeny nižší hodnoty, je však dobrým ukazatelem nesouososti nebo ohnutého hřídele



Obrázek 5 — Umístění snímačů [16]

Na obrázku je znázorněno umístění snímačů v nejběžnějších směrech. Žlutá znázorňuje "pochůzkový" směr, který je určený pro rychlou pochůzku. Nejpřesnějšího výsledku dosáhnou měření ve třech základních směrech : Radiální (červená šipka), horizontální (zelená šipka) a axiální (modrá šipka).

Na tomto konkrétním motoru , i na mnou měřených motorech, jsou umístěny snímače vpředu i vzadu, protože tam jsou zkoumaná ložiska.

### 1.3 Snímače vibrací

Za účelem měření mechanické výchylky a její převod na ele. veličinu, kterou budu dále zkoumat a se kterou budu pracovat, používám snímače vibrací. Aby bylo dosaženo co



nejlepších výsledku, tak existuje celá řada snímačů, rozdělených podle jejich funkce, způsobu příchycení atd. Liší se podle účelů použití, tj. přesnost, rozsah frekvence, způsob použití, cena, výchyly atd. Základní rozdělení snímačů lze rozdělit do dvou kategorií:

**Seismická zařízení**, jejíž výstup je mírou absolutních hodnot a která se normálně připevňují na konstrukci stroje.

**Snímače relativní výchylky**, které měří relativní výchylku mezi strojem co rotuje a díly strojního zařízení, které nerotují.

### 1.3.1 Umístění snímačů

Snímače umístím přímo na materiál, který je v přímém kontaktu s ložiskem. Ne na plechové kryty nebo přechody apod. V nejlepším případě provádím měření v pravidelných cyklech a na stejných místech. Proto je dobré místa umístění označit pro budoucí porovnávací měření. Je to vhodné pro porovnávání výsledků a následné trendování. - 14 -

Při umisťování snímače dodržuji bezpečnost, dávám pozor na rotující součásti, beru v potaz dostupnost měřících míst, dávám pozor na to, aby se snímač nepoškodil (není to levná záležitost).

Než snímač umístím je potřeba očistit plochu, na níž chci snímač umístit. Znečistěná plocha může být jedním z faktorů, který potom ovlivní věrohodnost a správnost naměřených hodnot.

## 1.4 Mechanické příčiny vibrací

- Nevyváženost
- Mechanické uvolnění
- Rezonance
- Problémy s ložisky
- Nesouosost

### 1.4.1 Nevyváženost

Nevyváženost patří k nejčastějším zdrojům vibrací. Nevyvážený rotující stroj nemá hmotnostní osu stejnou jako osu konstrukční. To znamená, že se objevuje s frekvencí přesně jedenkrát za otáčku (otáčková frekvence). Amplituda roste, když se otáčky stroje blíží prvním kritickým otáčkám stroje. V oblasti kritických otáček nelze vyvažovat. Jsou tři druhy nevyváženosti: statická, momentová a dynamická. K odstranění problému se používají vyvažovací stroje ("vyvažovačky").

•Kritické otáčky — K tomuto jevu dochází, když je rotační prvek sestavy rezonující složkou a jeho otáčky odpovídají vlastní frekvenci rotoru. Zjednodušeně to znamená vysoké vibrace stroje nebo jeho části při určitých provozních otáčkách.

Jednotkou neváženosti je gram milimetr  $[g \cdot mm^2]$ , tj. hmotnostní moment. Tím je určená odstředivá síla působící směrem proti podporám (ložiskům) při roztočení součástí.

#### **1.4.1.1 Statická nevyváženost**

Jinými slovy silová nevyváženost, je ve fázi a je stacionární. Vyskytuje se výjimečně. Amplituda se zvětšuje společně s kvadrátem otáček. Měřením amplitudy vibrací na ložiskových domcích zjistíme přímo velikost nevývahy. Statická nevyváženost má hmotnostní osu posunutou vůči ose rotace. Osy jsou však navzájem rovnoběžné.

Projev ve vibračním spektru — Statická nevyváženost se projevuje jako výrazná amplituda na otáčkové frekvenci v radiálním směru v obou ložiskách s malým nebo nulovým fázovým posunem. (+/-30°). Pokud se ve spektru projevují harmonické násobky ot. frekvence, ukazuje to na vysokou nevyváženost nebo na vymezování vůlí v ložiskách.

#### **1.4.1.2 Momentová neváženost**

Momentová nevyváženost za následek pohyb 180° v protifázi na stejném hřídeli. Může způsobit vysoké vibrace jak v axiálním, tak v radiálním směru. Osy rotace a hmotnostní osa jsou navzájem různoběžné, ale protínají se v těžišti.

Projev ve vibračním spektru — momentová nevyváženost se opět projevuje výraznou amplitudou v radiálním směru na obou ložiskách s malým nebo nulovým fázovým posunem. Fázový rozdíl mezi horizontálním a vertikálním směru se pohybuje okolo 90° (+/- 30°).

#### **1.4.1.3 Dynamická nevyváženost**

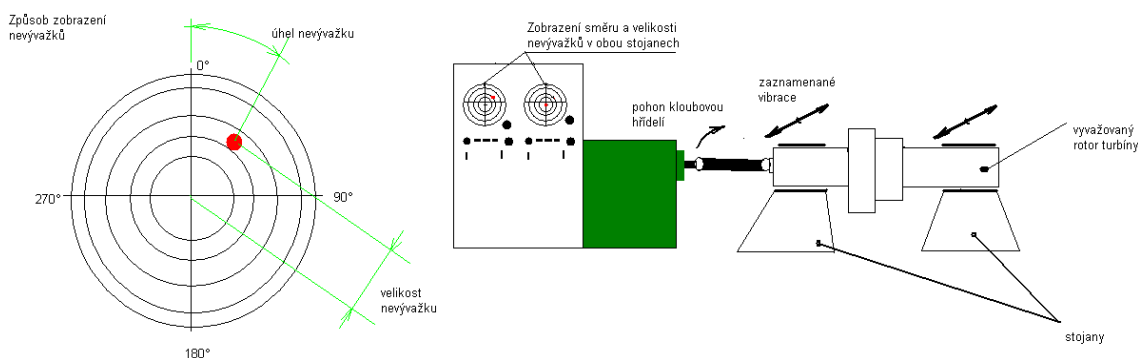
Nejčastěji se vyskytující nevyváženosti. Ta v sobě kombinuje jak statickou tak momentovou nevyváženost. Hmotnostní osa se s osu rotace neprotíná v těžišti, ani nejsou rovnoběžné, k průniku dochází mimo těžiště.

Projev ve vibračním spektru — Ve vibračním spektru dominuje první harmonická složka. Tady může být fázový rozdíl mezi horizontálními vibracemi na vnějším a vnitřním ložisku jakýkoliv mezi 0 až 180°. Avšak fázový rozdíl v horizontálním směru má výrazně souhlasit s fázovým rozdílem ve vertikálním směru při porovnání měření na vnějším a vnitřním kroužku ložiska (+/-30°). Pokud převládá nevyváženost, je asi 90° rozdíl fází mezi horizontálními a vertikálními vibracemi na každém ložisku (+/-40°). Tyto nevyvážky se musí řešit v každé vyvažovací rovině zvlášť. [10]

#### 1.4.1.4 Vyvažovačky

Přístroje sloužící k vyvažování rotorů. Rozlišujeme je na vyvažovací stroje s tuhým nebo s měkkým uložením

S **tuhým uložením** jsou obecně méně přesné, ale levnější, rychlejší a jednodušší k použití. Vyvažovací stroje s **měkkým uložením** ložisek je obvykle třeba nastavit pro každý rotor zvlášť. Vyvažovačky se nastavují pomocí zkušebních závaží ve vyvažovacích rovinách, aby se zjistil jejich vliv na (ne)vyváženost rotoru. Tím pádem odpadá nutnost předem zadávat rozměry rotoru a polohu jeho rovin. [11]



Obrázek 6 — Vyvažovací přístroj [12]

#### 1.4.2 Mechanické uvolnění

Při mechanickém uvolnění se může jednat o uvolnění spojů, základny od podložky, defekt ložiska apod. Tato vůle může vzniknout při mechanickém namáhání a přenosu sil do pevných vazeb, které postupem času svou únavou a opotřebením ztratí schopnost svojí pevnosti. V některých případech lze detekovat uvolnění i pouhým okem, takže než začnu měřit, tak si celou konstrukci prohlédnu. Zaměřuji se na šrouby u základového rámu konstrukce, špatný stav ložiskových domků apod. Signál vibrací mechanického uvolnění je periodický. Tento zdroj vibrací je pro mě nežádoucím efektem pro identifikaci jiných zdrojů vibrací, protože jeho spektrum má zastoupení mnoha různých složek ( $2x$ ,  $3x$ ,  $4x$ ,...). Pro správnou diagnostiku musím nejprve odstranit právě vliv mechanického uvolnění a teprve poté můžu pokračovat v další diagnostice stroje.

#### 1.4.3 Rezonance

Rezonanční vibrace rotačních strojních zařízení se vyskytují mnohem častěji, než se obecně předpokládá. U strojů s rotujícími částmi, vznikají periodické síly, které jsou přenášeny nejen na vlastní zařízení, tj. na upínací patky apod., ale i na jeho okolí, např. na podlahu nebo

základový rám. K rezonanci dochází pokaždé, když se vynucená (budící) frekvence kryje s vlastní frekvencí, tím může dojít k výraznému zvýšení amplitudy rezonančním zesílením, což má vždy za následek předčasnou a často také katastrofickou poruchu.

- **Vlastní frekvence** je například samotná frekvence určitého rotoru, ale často taky frekvence podpěrného rámu, převodovky nebo dokonce to může být frekvence hnacích řemenů.

- **Vnucené frekvence** jsou frekvence, které mají svůj původ v nevývaze, vychýlení, závadách ložisek, uvolnění, závadách ozubených kol, opotřebením řemenů apod. (poruchové frekvence).

#### **1.4.3.1 *Projevy rezonance***

- Nedostatečná odezva na pokusy stroj vyvážit.
- Nadměrný pohyb a dynamické napětí rezonančních částí.
- Vysoce směrová vibrace — V jednom směru je mnohem větší amplituda než v ostatních. Pokud se jedná o rezonanční vibrace, tak můžou být v rezonančním směru 5x až 20x vyšší vibrace než ve zbývajících dvou.
- Fázové chování v rezonančním směru měření — Rezonanční frekvence je doprovázena výraznou změnou fáze ve směru, ve kterém stroj rezonuje, protože fáze se změní o 90° na vlastní frekvenci, a skoro o 180°, jakmile zcela projde rezonancí, v závislosti na tlumícím faktoru.

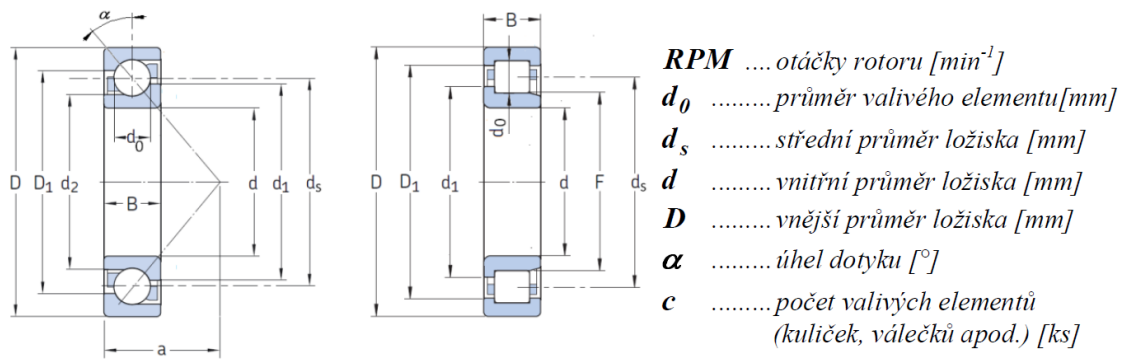
#### **1.4.3.2 *Způsoby potlačení rezonančních kmitů***

Aby nevznikly rezonanční kmitání tak se vlastní frekvence zařízení upraví tak, aby se lišila od frekvence sil které vynucují kmitání i od jejich násobků. V technické praxi jsou používány tyto tři způsoby :

- **Změna vlastní frekvence mechanismu** — Změna tuhosti, hmotnosti, přidání izolačních mechanismů.
- **Změna tlumení** — Přidání tlumících materiálů, přidání vyladěného tlumiče atd.
- **Odstranění budících frekvencí přesným dynamickým vyvážením**

#### **1.4.4 *Problémy s ložisky***

Frekvence otáčení jednotlivých částí ložiska jsou vypočteny z obvodových rychlostí spoluseodvalujících částí (vnitřní kroužek, kuličky, válečky, klec, vnější kroužek). Předpokládáme-li, že se vnější kroužek neotáčí, provádí se výpočet frekvencí, na kterých se poškození jednotlivých částí ložiska projeví, provádí se podle následujících vztahů.



Obrázek 7 — Náčrt rozměrů valivého ložiska [9]

- Střední průměr ložiska

$$d_s = 0,5 \cdot (D + d) \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

- Frekvence kmitání způsobená poškozením vnějšího kroužku

$$\text{BPFO} = \frac{c}{2} \cdot \frac{\text{RPM}}{60} \cdot \left[ \left( 1 - \frac{d_0}{d_s} \right) \cdot \cos \alpha \right] \quad [\text{Hz}] \quad (5)$$

- Frekvence kmitání způsobená poškozením vnitřního kroužku

$$\text{BPFI} = \frac{c}{2} \cdot \frac{\text{RPM}}{60} \cdot \left[ \left( 1 + \frac{d_0}{d_s} \right) \cdot \cos \alpha \right] \quad [\text{Hz}] \quad (6)$$

- Frekvence kmitání způsobená poškozením valivého elementu

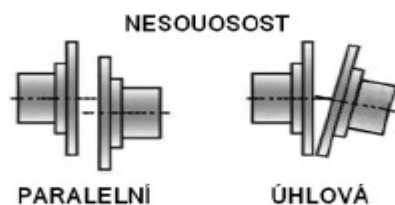
$$\text{BPFO} = \frac{d_s}{2 \cdot d_0} \cdot \frac{\text{RPM}}{60} \cdot \left[ \left( 1 - \left( \frac{d_0}{d_s} \right)^2 \right) \cdot \cos^2 \alpha \right] \quad [\text{Hz}] \quad (7)$$

#### 1.4.5 Nesouosost

S existencí rotujících pohonných jednotek je spojována i existence problému nesouososti. Nesouosost je v soustrojí často podceňovaný, ale neméně závažný problém. U každého stroje se pokaždé projeví zvýšeným hlukem, vibracemi, neobvyklým zahříváním určitých částí atd. S tím souvisí rychlejší opotřebení ložisek, spojek a těsnění. To vede ke zbytečné degradaci a ztrátě olejů a maziv, k četnější poruchovosti a v konečném důsledku k výraznému snížení provozní životnosti stroje. Z hlediska financí to podnikatelům přináší nemalé, ale hlavně zbytečné, výdaje. Většina odborníků může potvrdit, že minimálně polovině závad na stroji jde předejít správným ustavením stroje.

#### 1.4.5.1 Druhy nesouososti

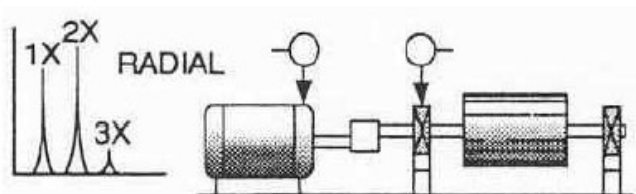
Máme 2 základní druhy nesouososti.



Obrázek 8 — Základní druhy nesouososti

##### Paralelní (rovnoběžná)

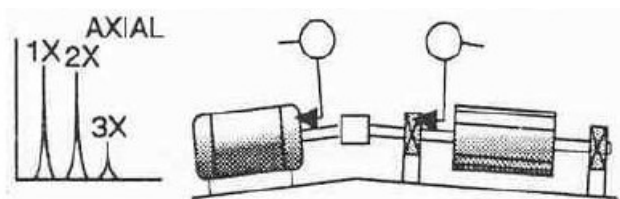
V případě, že se jedná o rovnoběžnou nesouosost, nejsou osy hřídelů vůči sobě úhlově nakloněné, ale posunuté. Dochází k velkým vibracím v radiálním směru projevující se špičkou dvojnásobné otáčkové frekvence. Její velikost závisí na typu a konstrukci spojky. V radiálním směru je fázový posun  $180^\circ$ . Ustavením chci dosáhnout takového stavu, kdy rotační osy obou ustavovaných strojů budou souosé, z čehož vyplývá, že musím eliminovat posunutí ve všech bodech podél hřídele.



Obrázek 19 — Paralelní nesouosost, projevy ve spektru [10]

##### Úhlová

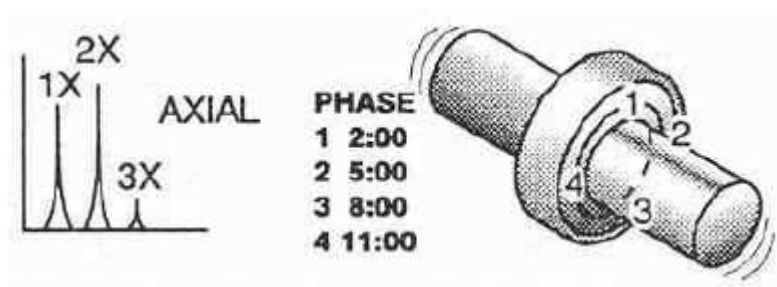
Při této nesouososti osy hřídelů nejsou rovnoběžné. Sklon je určen jako rozdíl posunutí v libovolných dvou rovinách. Úhlová nesouosost vyvolává zvýšené vibrace v axiálním směru, projevující se ve spektru vysokou špičkou na základní otáčkové frekvenci, dvojnásobné otáčkové frekvenci, ale i trojnásobné (vibrace bývají přes spojku v protifázi posunuté o  $\pm 180^\circ$ ). Jsou větší než vibrace v radiálním směru způsobené paralelní nesouosostí a v horizontálním směru budou mít jinou hodnotu než ve vertikálním. Pokud budou v těchto směrech vibrace stejné, jde pravděpodobně o projev nevývahy.



Obrázek 10 — Úhlová nesouosost, projevy ve spektru [10]

V praxi většinou nacházíme kombinaci jen těchto dvou základních typů nesouososti, a to jak v horizontální, tak i ve vertikální rovině. Pozor, jejich velikosti v obou rovinách jsou často různé. V praxi se můžeme setkat ještě s jedním typem nesouososti a tím je "**nesouosé ložisko, nakřivo na hřídeli**"

- Nesouosé ložisko generuje výrazné axiální vibrace, působí kroutivý pohyb s fázovým rozdílem mezi vibracemi nahoře a dole nebo po obou stranách přibližně 180°. Pokusy o ustavení spojky nebo o vyvážení rotoru nezlepší stav, ložisko obvykle musí být demontováno a nasazeno znovu a správně. [10]



Obrázek 11 — Nesouosé ložisko, projevy ve spektru[10]

#### 1.4.5.2 Ustavení

S existencí rotujících pohonných jednotek existuje problém s nesouosostí. Je naprosto nezodpovědné, je-li nový rotující systém zabudován doslova tak, že je napevno přidělaný k zemi, aniž by se někdo kvalifikovaný věnoval správnému ustavení a umožnil tak relativně bezproblémový chod.

Při ustavování stroje hraje hlavní roli to, jestli je stabilní. Nestabilní stroj je takřka nemožné ustavit. Jestli je stroj stabilní se většinou odvíjí od jeho stáří, opotřebení, ale hlavně od základu, ke kterému je ustaven. Nejčastější příčinou ztráty stability stroje je problém se základovým rámem a s tzv. měkkou patkou. Ustavení by měl provádět zkušený pracovník a měl by mít k dispozici výkonné a přesné stroje na určení a nápravu problematiky.

#### Tři fáze ustavení

##### 1. fáze — Příprava (Pre-Alignment)

V první etapě provedu předběžné rozdělení práce a také se uskutečním předběžné kontroly, které pomohou k hladkému průběhu následujících etap ustavování. Kontroluji teplotní nárůst, volím se ustavovací metody, kontrola opotřebení (run-out) hřídele a spojky, odpojení příslušenství, atd.



## **2. fáze — Hrubé ustavení (Rough Alignment)**

V této etapě už musím zajistit, aby osy hřídelů strojů byly víceméně v ose (in-the-ballpark). Nejsou žádné normy nebo pravidla na to, jaké má ustavení hřídelů být, než přikročím k přesnému ustavení. Je to etapa, ve které mi jde hlavně o to, ať jsou osy hřídelů u sebe a přibližně v ose, aby se potom mohlo zahájit samotné přesné ustavení stroje.

## **3. fáze — Přesné ustavení (Precision Alignment)**

V této fázi se už dostávám k přesnému ustavení stroje. Cílem této etapy je to, aby na konci byly hřídele správně ustaveny s rámci přesných tolerancí. Pro provedení nápravy neustavení je zapotřebí mít spolehlivé a výkonné zařízení. [15]

## **1.5 Termodiagnostika**

Diagnostika zařízení, která zkoumá teplo generované daným zařízením, se nazývá termodiagnostika. Ke stanovení teploty se používají IR termokamery nebo dotykové teploměry.

Teplota strojního uzlu má jistou souvislost s technickým stavem strojního celku. V případě, že je zhoršený technický stav stroje, dochází k zvýšenému tření uvnitř strojního zařízení což vede ke zvýšení teploty. Toto tření způsobuje mechanické poškození stroje, které vede dříve nebo později k havárii. S výhodou se IR termokamery a dotykové teploměry kombinují s dalšími metodami technické diagnostiky pro zpřesnění nálezů a k lepšímu pochopení jednotlivých poruch strojů. [13]

## 2 Analýza současného stavu motoru

V této druhé části mé bakalářské práce se zaměřuji na analýzu současného stavu motorů firmy Kotouč Štramberk – LB Cemix, s.r.o. Z důvodů epidemie COVID-19 jsem nebyl schopen udělat více než jedno měření každého motoru, proto budu vycházet jenom z jednoho měření. Tím pádem se nedozvím zda mé teoretické řešení fungovalo.

Neudávám všechny obrázky ke všem vyskytujícím se chybám. U každého zkoumaného stroje udávám maximálně 4 obrázky spekter vibrací. Jsou to obrázky, které jsou podle mě důležité. Nevycházím jen z uvedených obrázků, ale z celého měření.

### 2.1 Použité měřicí přístroje

#### 2.1.1 Vibrodiagnostika

Pro měření vibrací byl využit přístroj na měření vibrací, který je vyráběn a vyvíjen firmou ADASH a.s. Jedná se o přenosný model ADASH VA4 PRO, který slouží k měření vibrací, jehož systém využívá unikátní DSP (=Digital Signal Processing) desce vyvíjené rovněž firmou Adash. Přístroj se dodává včetně snímačů vibrací. Provedené měření bylo v souladu s normou ČSN ISO 10 816-3

ADASH VA4 PRO je přístroj, který mi společně se snímači, dokáže změřit rychlost a zrychlení vibrací a to následně převést do vibračních spekter, ze kterých potom po přezkoumání určím možnou příčinu nežádoucích vibrací.



Obrázek 12 — Přístroj na měření vibrací ADASH VA4 PRO [6]

### 2.1.2 Termodiagnostika

K pořízení termografických snímků byla použita IR Termokamera: FLUKE Ti55, SN:Ti55FT1101022, datum kalibrace 14.8.2014, kalibrační certifikát č. 201403437, kal. labor. ZTS Elektronika SKS s.r.o. Reg. No. 066/K-004. Spektrální rozsah 8 – 14  $\mu\text{m}$ , detektor nechlazený detektor FPA 320 x 240 pixelů, 20mm objektiv 23° x 17°, rozsah měřených teplot – 20 °C až + 350 °C , IFOV 1,3 mrad.

IR Termokamery dokážou, na rozdíl od lidského zraku, snímat infračervené záření emitované předměty zahrnující záření okolních předmětů, které se ve snímaných předmětech zrcadlí (emisivita vs. reflexivita). Platí, že nekovové materiály a natřené kovy mají vysokou schopnost vyzařování (emisivitu) a tím naopak minimum energie odrážejí (reflexivita) a měření je pak poměrně velice přesné. Problémy mohou nastat při měření čistých, lesklých kovů, kdy vyzářená energie o dost menší, pouze cca do 10%, ale odražená složka je vysoká 90 a více %! Proto jsou v tomto měření umístěny měřící body na místa s vysokou emisivitou. Naopak na čistém kovu se mohou zrcadlit teploty z okolí měřených zařízení. [13]

Dále byl použit dotykový teploměr: Teploměr FLUKE t3000 FC a čidlo teploty SN: 29600052, datum kalibrace 18.5.2016, kalibrační list č. 2016/0474, kal. labor. PEMIT, s.r.o. Reg. No. 2337

## 2.2 Popis měření

### 2.2.1 Vibrodiagnostika

Považuji za důležité zmínit, že měření vibrací se provádělo v souladu s normou ČSN ISO 10 816-3. Pro měření vibrací motorů pohánějící ventilátory v provozu jsem použil analyzátor vibrací ADASH VA4 PRO. Výsledkem měření jsou 2 veličiny přičemž první naměřenou veličinou je efektivní hodnota rychlosti vibrací ( $v_{\text{RMS}}$ ), [mm/s] a druhou naměřenou veličinou je hodnota zrychlení vibrací ( $a_{\text{RMS}}$ ), [g]. Pásmo vibrací, hodnoty doporučené normou a hodnoty doporučené vedoucím práce jsou uvedeny v Tabulce 1 a Tabulce 2.

Rozhraní pásem	Efektivní hodnota zrychlení vibrací [g]
A/B	0,5 g
B/C	2 g
C/D	4 g

Tab. 1 — Doporučené hodnoty pro zrychlení vibrací v pásmu 500-25000 Hz [14]

Rozhraní pásem	Efektivní hodnota rychlosti vibrací [mm/s] Pružné uložení skupina III.
Počáteční (A/B)	6,3 mm/s
Výstraha (B/C)	9,0 mm/s *
Odstavení (C/D)	12,5 mm/s

Tab. 2 — Doporučené hodnoty pro rychlost vibrací v pásmu 10-10000 Hz[14]

Podle naměřených výsledků jsou strojní zařízení zařazeny do pásma charakterizující jeho současný stav. Do tohoto pásma jsou strojní zařízení zařazeny na základě doporučených hodnot normou ČSN ISO 10 816-3 a vedoucím práce. V tab.1 zrychlení vibrací ložisek vidím, že do pásma A/B jsou zařazeny hodnoty od 0 do 2. Do pásma B/C pak spadají hodnoty od 2 do 4 a do posledního pásma C/D spadají hodnoty od 4 výše. V tab.2 rychlosti vibrací ložisek vidím, že do pásma A/B jsou zařazeny hodnoty od 0 do 6,3. Do pásma B/C pak spadají hodnoty od 6,3 do 12,5 a do posledního pásma C/D spadají hodnoty od 12,5 výše.

**Pásmo A/B:** Do tohoto pásma jsou zařazeny obvykle nové stroje. Stroj, jehož vibrace spadají do pásma A/B, může být zpravidla provozovaný po neomezenou dobu. Dostává-li se mu pravidelné kontroly a kvalitní údržby.

**Pásmo B/C:** Jestliže naměřené hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací spadají do pásma B/C znamená to, že stroj je za normálních okolností považován za neuspokojivý pro dlouhodobý provoz. Takové stroje se dají obecně používat do doby, než se naplánuje výluka a následná oprava, nebo do doby než naměřené hodnoty nepřekročí do pásma C/D. U strojů v pásmu B/C se doporučuje pravidelná kontrola a sledování trendu měření. V mojí práci dávám mnohdy přednost okamžitému zásahu jedná-li se mazání ložiska.

**Pásmo C/D:** V případě, že se hodnoty rychlosti a zrychlení vibrací nachází zde, je nutný okamžitý zásah. Naměřené hodnoty jsou kritické a další provoz stroje se nedoporučuje. V pásmu C/D jsou převážně stroje, co nějakou vážnější poruchu mají nebo co jsou suž starší. V extrémních případech může dojít k havárii a k ohrožení osoby obsluhující daný stroj.

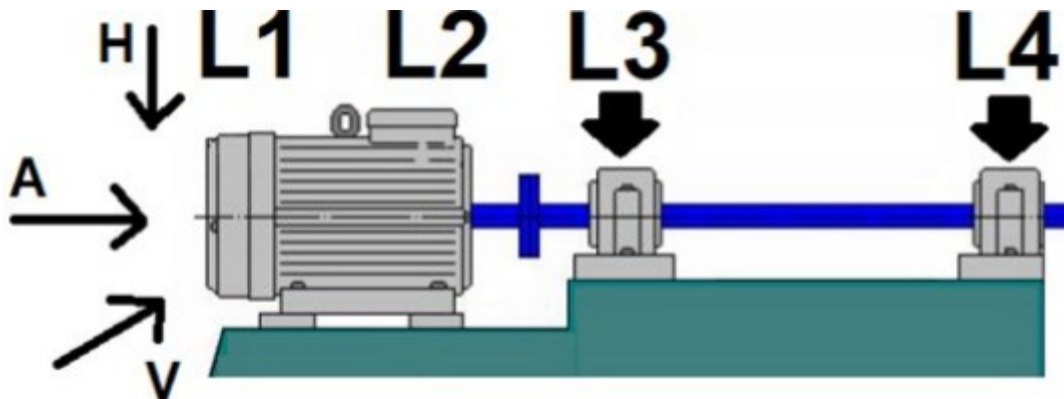
Nakonec je vyhodnocený celkový stav stroje na základě vibrodiagnostiky, termodiagnostiky a akustiky. Celkový technický stav stroje je rozdělen do tří hlavních kvalifikací:

### **VYHOVUJÍCÍ - ZHORŠENÝ - NEPŘIJATELNÝ**

V tabulkách jsou směry měření označeny V (vertikální), H (horizontální), A (axiální). Dále v textu používám zkratky typu: L4-V.a — L4 je označení ložiska, V je označení směru (vertikální), "a" je označení zrychlení vibrací ložiska, pokud tam bude L4-V.v, pak se jedná o rychlost vibrací ložiska L4 ve vertikálním směru.

U spekter zrychlení vibrací jsem udělal hranici na ose Y s hodnotou okolo 0,05g, tato hranice mi byla doporučena vedoucím práce jako kontrolní pro kontrolu stavu maziva v oblasti 5500 až 10000 Hz.

Všechny sestavy na měření mají víceméně stejný tvar ,a proto uvádím univerzální obrázek na umístění snímačů na měření vibrací.



Obrázek 13 — Pohled na měřené směry vibrací a měřící místa [8]

### 2.2.2 Termodiagnostika

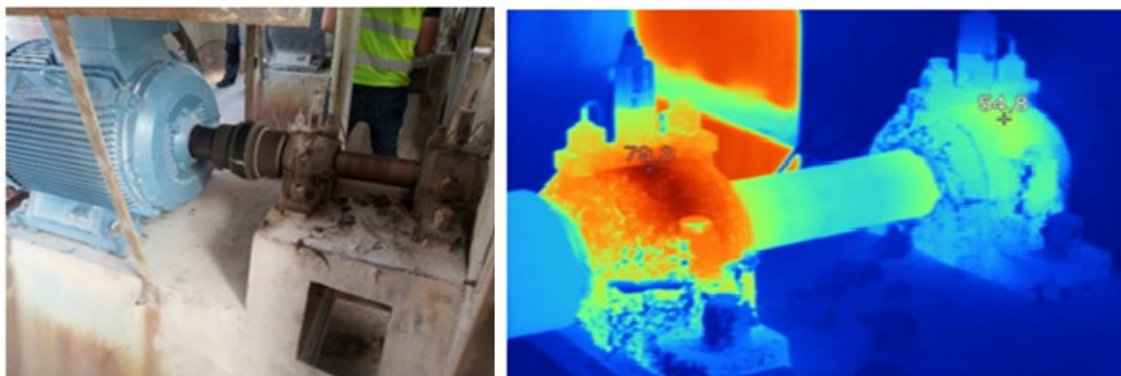
Na začátek chci uvést, že termodiagnostickou zprávu [13] používám společně s mými naměřenými hodnotami ve vibrodiagnostice pro stanovení co možná nejpravdivějšího výsledku. Více o termodiagnostice naleznete zde 2.1.2.

Termodiagnostické měření bylo provedeno ve společnosti LB Cemix Štramberk, za účelem stanovení teplotních polí strojních zařízení pro zpracovávání vápence. Měření bylo provedeno dne 17.10.2019.

Pro kompenzaci chyb IR měření bylo použito dotykové měření kalibrovaným teploměrem a následná kompenzace v IR termokameře. Zpráva je vypracovaná v souladu s normou ČSN ISO 18 434-1.

## 2.3 ENVEN 1-4

### ENVEN-1



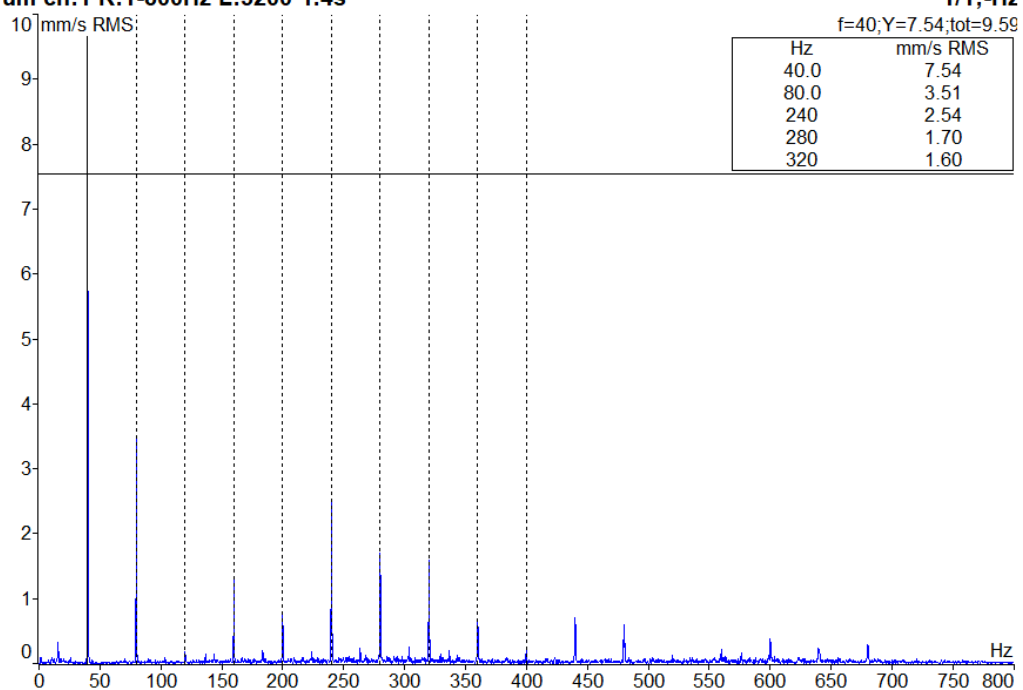
Obrázek 14 — Zařízení ENVEN 1 [13]

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10 - 10000 Hz ( $v_{RMS}$ ) a efektivní hodnota zrychlení vibrací v pásmu 50 - 25600 Hz ( $a_{RMS}$ )					
ENVEN - 1		motor		spojovací most	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr				
Max ot/min		2328			
$v_{RMS}$ ( mm/s )	V	3,48	7,8	10,3	5,4
	H	3,07	3,81	8,19	4,23
	A	4,15	3,97	3,54	3,64
$a_{RMS}$ ( g ) 500 - 25600 HZ	V	1,01	1,26	1,07	1,81
	H	1,35	1,99	1,62	2,07
	A	0,82	1,46	2,27	2,48

Tab. 3 — Naměřené hodnoty ENVEN 1

13 spectrum ch:1 R:1-800Hz L:3200 T:4s

1/1;-Hz

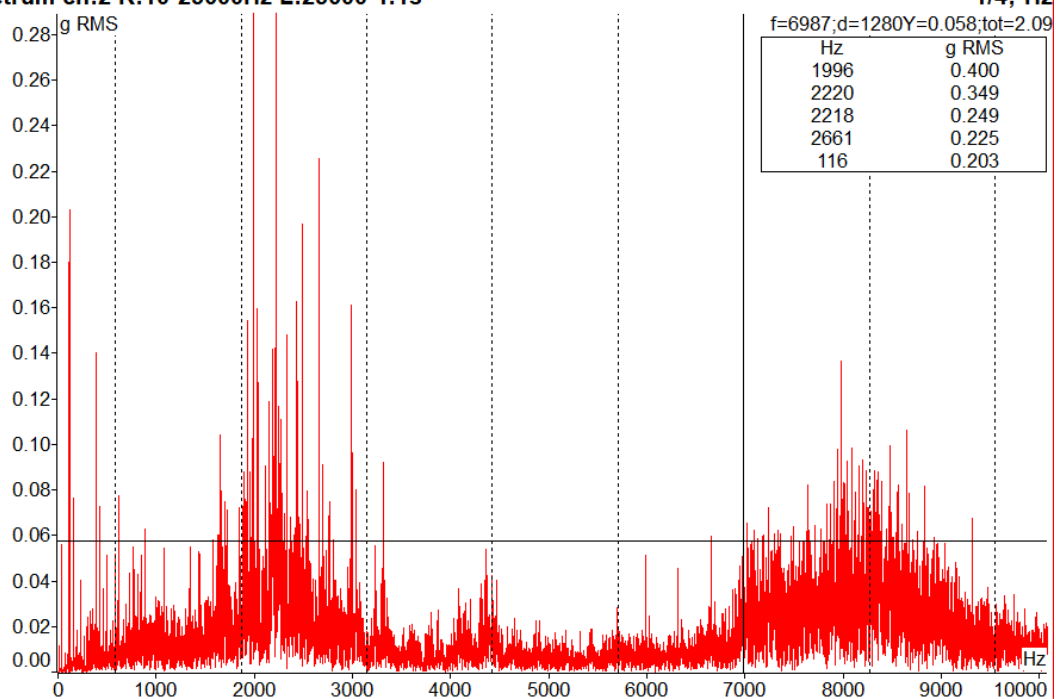


Obrázek 15 — Spektrum rychlostí vibrací L3-V [autor]

L3

29 spectrum ch:2 R:10-25600Hz L:25600 T:1s

1/4;-Hz



Obrázek 16 — Spektrum zrychlení vibrací L4 [autor]



### ENVEN-1 - ZHORŠENÝ technický stav

Hodnoty motoru jsou vyhovující – zabývám pouze spojovacím mostem. V místě L3 jsou zvýšené hodnoty zrychlení vibrací a rychlosti vibrací. V místě L4 jsou "jenom" zvýšené hodnoty zrychlení vibrací, ale ve dvou směrech. Všechny tyto hodnoty spadají do pásma C, kde je dlouhodobý provoz ložisek na spojovacím hřídeli neuspokojivý. Spektrum rychlosti vibrací ložiska L3 ve vertikálním směru ukazuje na nevývahu a také na poddajnou konstrukci. Když porovnám spektra zrychlení vibrací obou ložisek, tak hůře vypadá určitě L4, ale termografické snímky ukazují, že L3 má o dost vyšší teplotu než L4. Zvýšené hodnoty vibrací nad frekvencí 6000 Hz. To poukazuje na možný tribologický problém.

• **DOPORUČENÍ** - Naměřené hodnoty jsou v pásmu C a to znamená, že se stroj může používat, než se naplánuje odstávka a vyvážení. Doporučuji udělat kontrolu na poddajnost konstrukce. Provést domazání obou ložisek L3 a L4. Udělat tribodiagnostiku maziva L3. V případě, že se stav ložiska L3 po domazání výrazně nezlepší, tak doporučuji jeho výměnu.

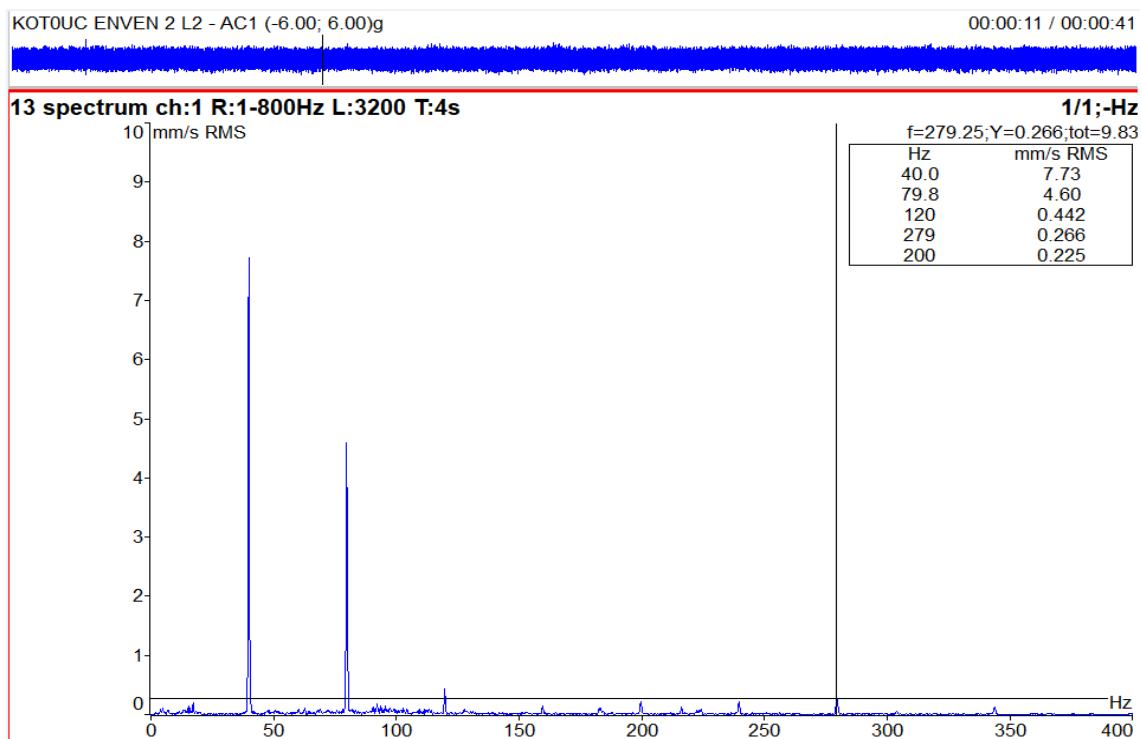
### ENVEN-2



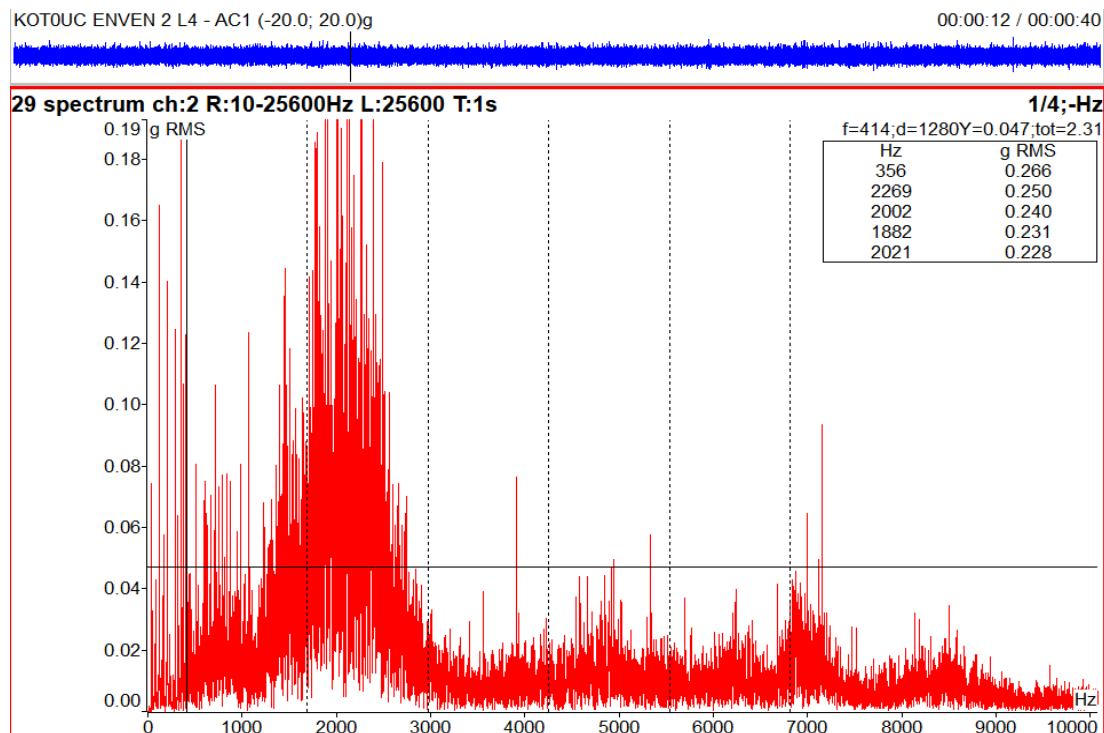
Obrázek 17 — ENVEN 2 [13]

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10 - 10000 Hz ( $v_{RMS}$ ) a efektivní hodnota zrychlení vibrací v pásmu 50 - 25600 Hz ( $a_{RMS}$ )					
ENVEN - 2		motor		spojovací most	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr				
Max ot/min		2385			
$v_{RMS}$ ( mm/s )	V	1,47	10,6	6,44	5,37
	H	3,1	7,6	4,68	4,67
	A	3,38	2,89	3,56	4,47
$a_{RMS}$ ( g ) 500 - 25600 HZ	V	1,05	0,774	2,05	1,84
	H	0,77	0,682	1,74	2,24
	A	0,75	0,851	2,51	2,43

Tab. 4 — Naměřené hodnoty ENVEN 2



Obrázek 18 — Spektrum rychlost vibrací L2 [autor]



Obrázek 19 — Spektrum zrychlení vibrací L4 [autor]

## ENVEN-2 - ZHORŠENÝ technický stav

Hodnoty motoru ani spojovacího mostu nejsou vyhovující – V místě L2 je ve vetrikálním směru zvýšená rychlost vibrací. V místě L3 jsou zvýšené hodnoty zrychlení vibrací ve dvou směrech (V, A). V místě L4 jsou zvýšené hodnoty zrychlení vibrací také ve dvou směrech (H, A). Všechny tyto hodnoty spadají do pásma C, kde je dlouhodobý provoz ložisek v motoru a na spojovacím hřídeli neuspokojivý. L4 má výraznější část spektra zrychlení vibrací okolo 2000 Hz než u L3. To může poukazovat na mechanickou příčinu poruchy. L3 má výraznější část spektra zrychlení vibrací okolo 7000 Hz poukazující na problémy s mazáním nebo mazivem. Graf rychlostí vibrací L2-V má vysokou hodnotu druhé otáčkové frekvence - podezření na nesouosost. Termodiagnostika - bez nálezu poruchy.

• **DOPORUČENÍ** - Stav spadá do pásma C: stroj může používat než se naplánuje jeho odstávka a náprava. Provézt ustavení stroje. Domazat L3 a L4. Nadále sledovat trendy rychlostí L2 a zrychlení vibrací L3 a L4. Pokud se stav ložisek výrazně nezlepší po domazání, tak doporučuji jejich výměnu.

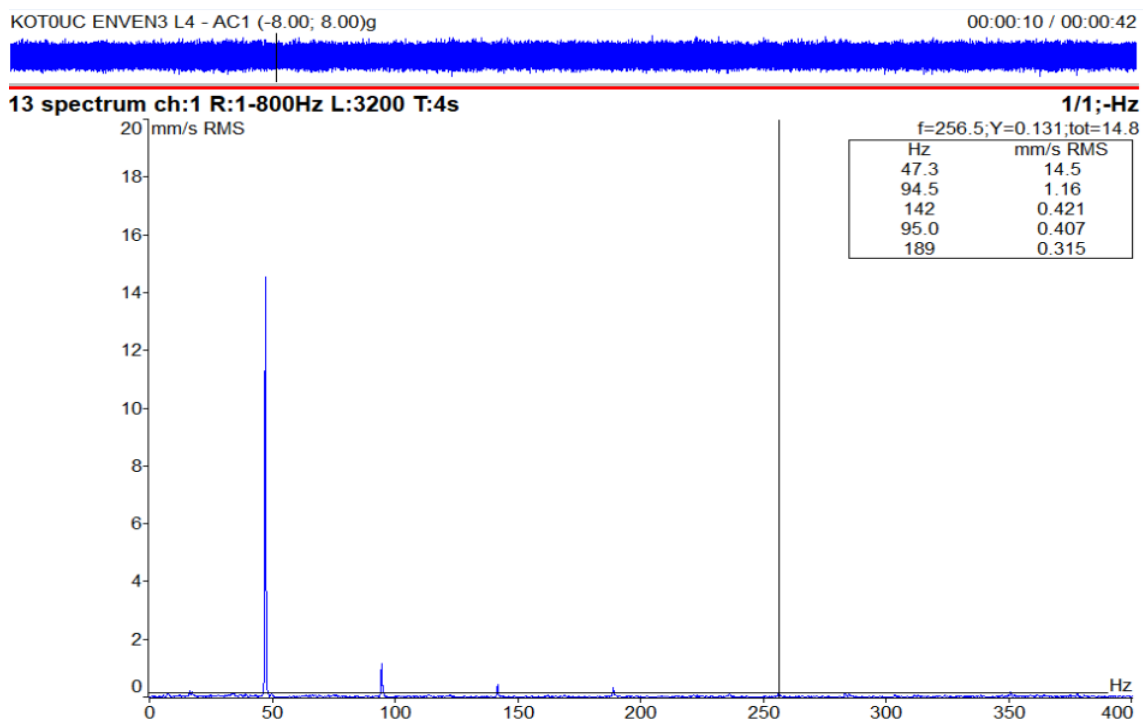
### ENVEN-3



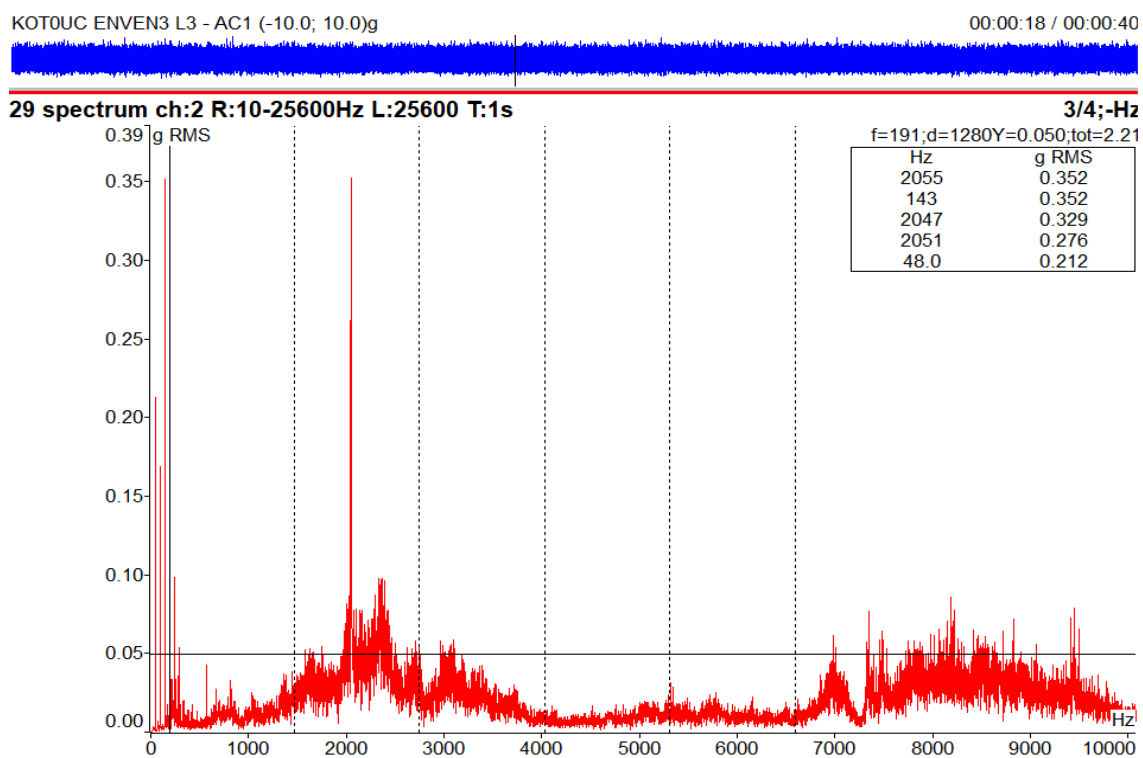
Obrázek 20 — ENVEN 3 a termosnímek [13]

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10 - 10000 Hz ( $v_{RMS}$ ) a efektivní hodnota zrychlení vibrací v pásmu 50 - 25600 Hz ( $a_{RMS}$ )					
ENVEN - 3		motor		spojovací most	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr				
Max ot/min		2865			
$v_{RMS}$ ( mm/s )	V	7,6	12,2	14,9	15,2
	H	4,95	7,32	9,36	7,24
	A	5,77	6,81	5,61	6,46
$a_{RMS}$ ( g ) 500 - 25600 HZ	V	0,46	0,709	1,39	1,27
	H	1,03	1,56	2,18	2,1
	A	0,46	0,921	2,55	2,42

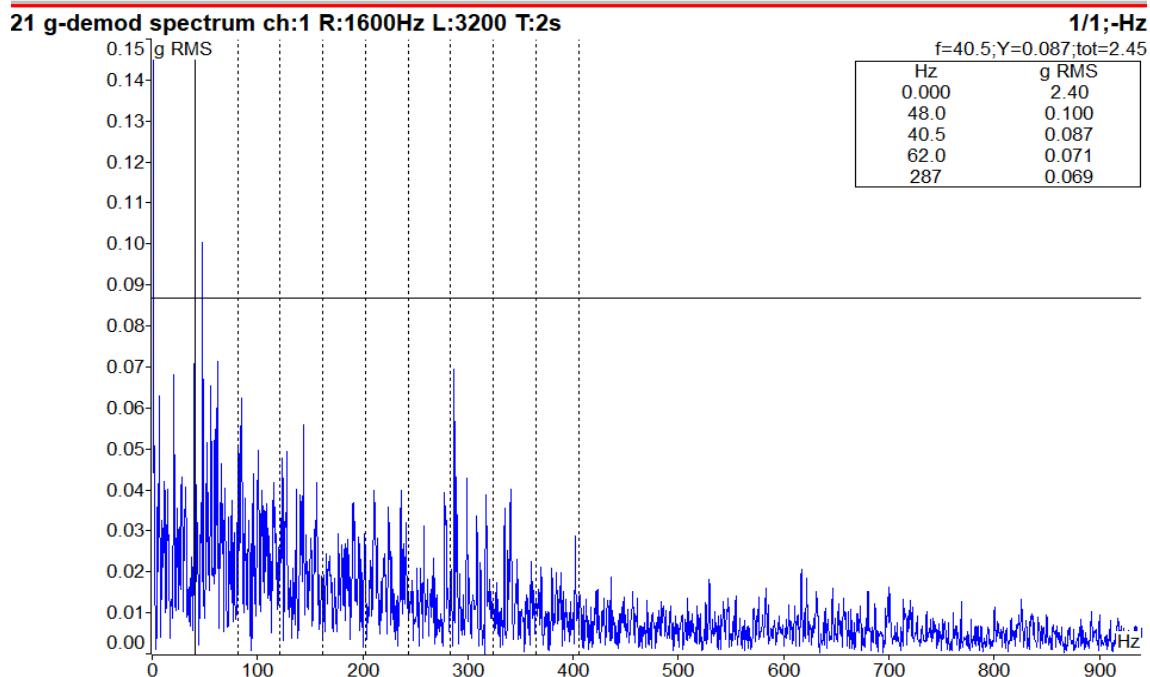
Tab. 5 — Naměřené hodnoty ENVEN 3



Obrázek 21 — Spektrum rychlostí vibrací L4-V [autor]



Obrázek 22 — Spektrum zrychlení vibrací L3 [autor]



Obrázek 23 — Spektrum obálky zrychlení L4 [autor]

### ENVEN-3 - NEPŘIJATELNÝ technický stav

Hodnoty motoru jsou v pořádku až na L2-V.v. Spojovacím mostu – Hodnoty v místě L3-V.v a L4-V.v spadají do pásma D, což vyžaduje okamžitý zásah. Hřídel ventilátoru jeví v uložení viditelné známky vůle včetně axiálního pohybu. Jedná se o nevývahu, kterou způsobuje málo tuhá konstrukce. Do pásma C spadají hodnoty zrychlení vibrací u L3 a L4. Z termodiagnostické zprávy vím, že v místě L3 je velmi zvýšená teplota a je nutný okamžitý zásah, L4 na to není o moc lépe z hlediska teploty. Obě ložiska mají podobné spektrum zrychlení vibrací, které poukazuje na chybu tribologického rázu. Ve frekvenčním spektru obálky zrychlení ložiska L4 jde vidět větší peaky, které nejsou násobkem otáčkové frekvence a je pravděpodobné, že se jedná o poruchové frekvence. Na problémy poukazuje i akustická zkouška.

- **DOPORUČENÍ** - Okamžitý zásah na vyvážení ventilátoru. Ložiska L3 a L4 domazat, pokud seto výrazně nezlepší, tak vyměnit. Další postup bych určil na základě naměřených hodnot po vyvážení. Doporučuji udělat tribodiagnostiku maziva L3 a L4, dále doporučuji udělat kontrolu na ustavení stroje.

## ENVEN-4

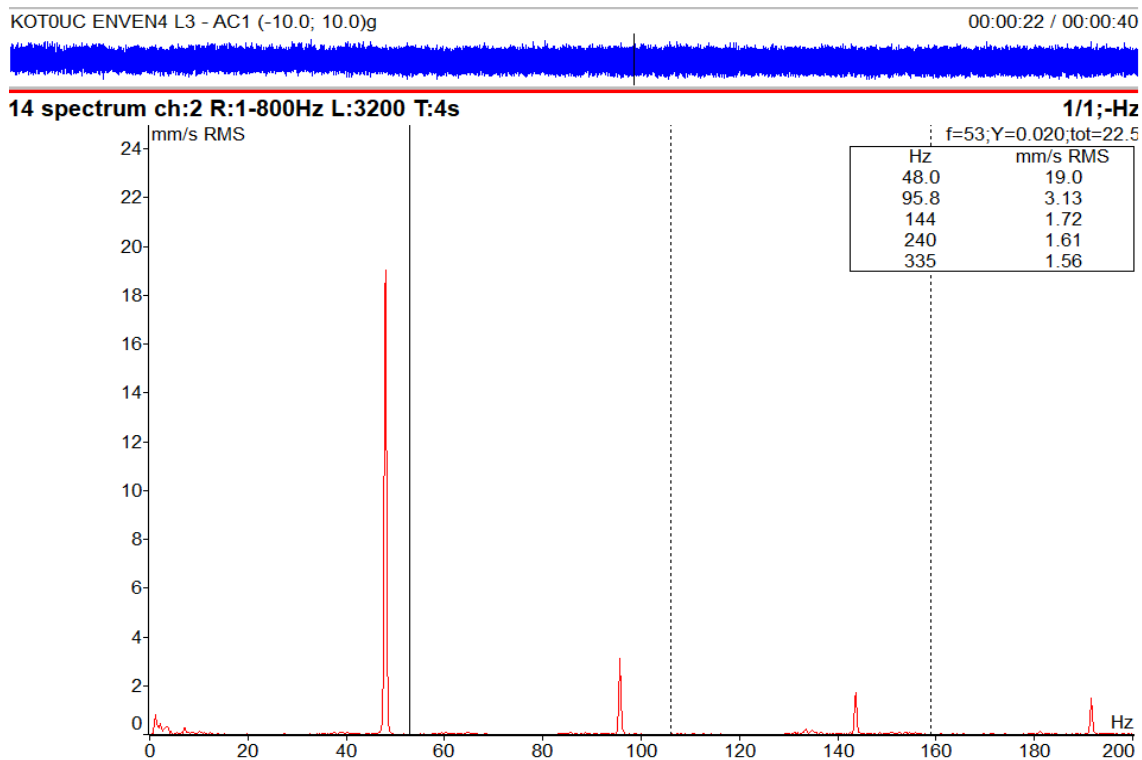


Obrázek 24 — ENVEN 4 [13]

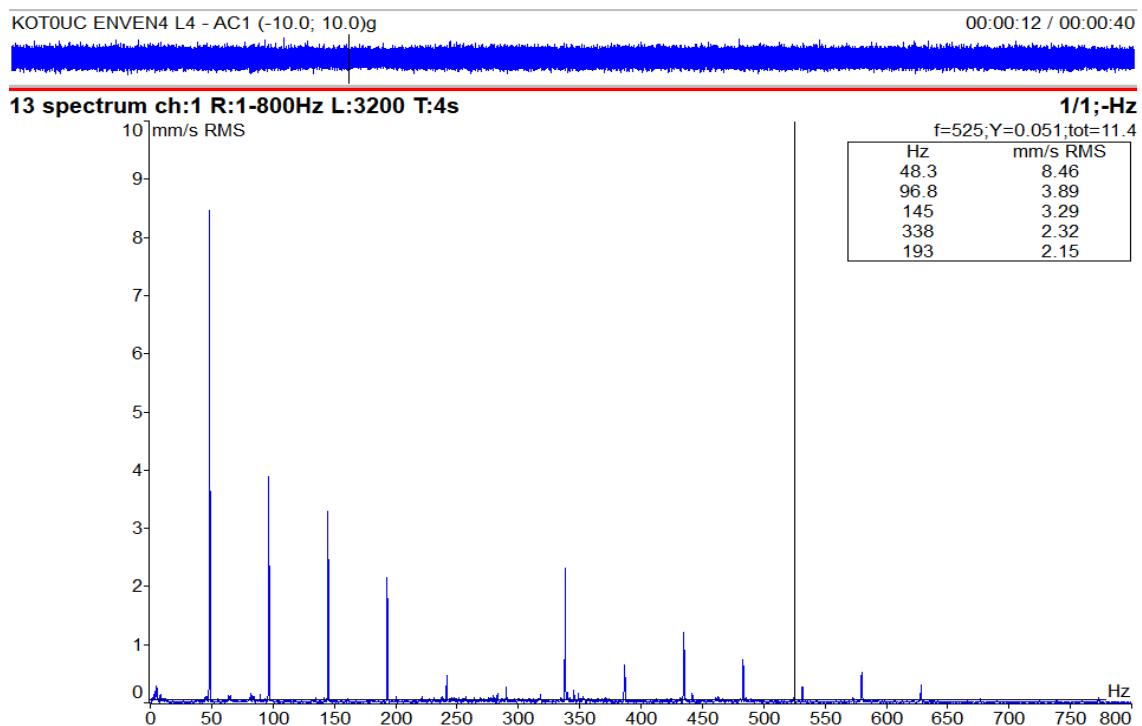
Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10 - 10000 Hz ( $v_{RMS}$ ) a efektivní hodnota zrychlení vibrací v pásmu 50 - 25600 Hz ( $a_{RMS}$ )					
ENVEN - 4		motor		spojovací most	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr				
Max ot/min		2865			
$v_{RMS}$ ( mm/s )	V	6,55	8,08	14,2	11,5
	H	7,31	15,7	22,5	14,4
	A	10,1	11,1	8,47	11,5
$a_{RMS}$ ( g ) 500 - 25600 HZ	V	0,339	0,458	0,995	1,05
	H	0,927	0,85	2,07	1,29
	A	0,584	0,897	0,671	0,923

Tab. 6 — Naměřené hodnoty ENVEN 4





Obrázek 25 — Spektrum rychlostí vibrací L3-H [autor]



Obrázek 26 — Spektrum rychlostí vibrací L4-V [autor]

#### ENVEN-4 - NEPŘIJATELNÝ technický stav

Vysoká hodnota rychlosti vibrací spadající do pásma D v L1 v axiálním směru, způsobené s největší pravděpodobností ohnutým hřídelem nebo nesouosostí. Hodnoty rychlostí vibrací jsou příliš vysoké v horizontálním směru u L2, L3 a L4, spadají do pásma D - vyžaduje okamžitý zásah. V pásmu D je taky L3-V.v. Z obrázků spekter vidím, že jde o nevývahu. ENVEN-4 má problém s konstrukcí. Na konstrukci jsem zaznamenal sváry, uvolnění a praskliny. Špatnou konstrukci ukazuje i spektrum rychlostí vibrací L4-V, je tam velká četnost peaků na ot. frekvenci. Ložisko je relativně v pořádku podle spekter. Nevylučuje se ani problém s rezonancí. Termodiagnostika - bez nálezu poruchy.

- **DOPORUČENÍ** - Dalším měřením zjistit fáze, ať můžu potvrdit nebo vyloučit problém nesouososti nebo ohnutého hřídele. Je nutný okamžitý zásah na vyvážení ventilátoru a na opravu konstrukce. Další postup bych určil na základě naměřených hodnot po vyvážení a opravení konstrukce.

## 2.4 EXHAUSTOR 1-4

### EXHAUSTOR-1



Obrázek 27 — EXHAUSTOR 1 [13]

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10 - 10000 Hz ( $v_{RMS}$ ) a efektivní hodnota zrychlení vibrací v pásmu 50 - 25600 Hz ( $a_{RMS}$ )					
EXHAUSTOR - 1		motor		spojovací most	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr				
Max ot/min		1470			
$v_{RMS}$ ( mm/s )	V	13,1	5,51	12,2	22,6
	H	24,5	10,5	15,7	32,8
	A	16,3	17,4	16,3	19,3
$a_{RMS}$ ( g ) 500 - 25600 HZ	V	0,261	0,788	1,9	1,79
	H	0,219	0,488	1,49	1,49
	A	0,239	1,11	1,05	1,4

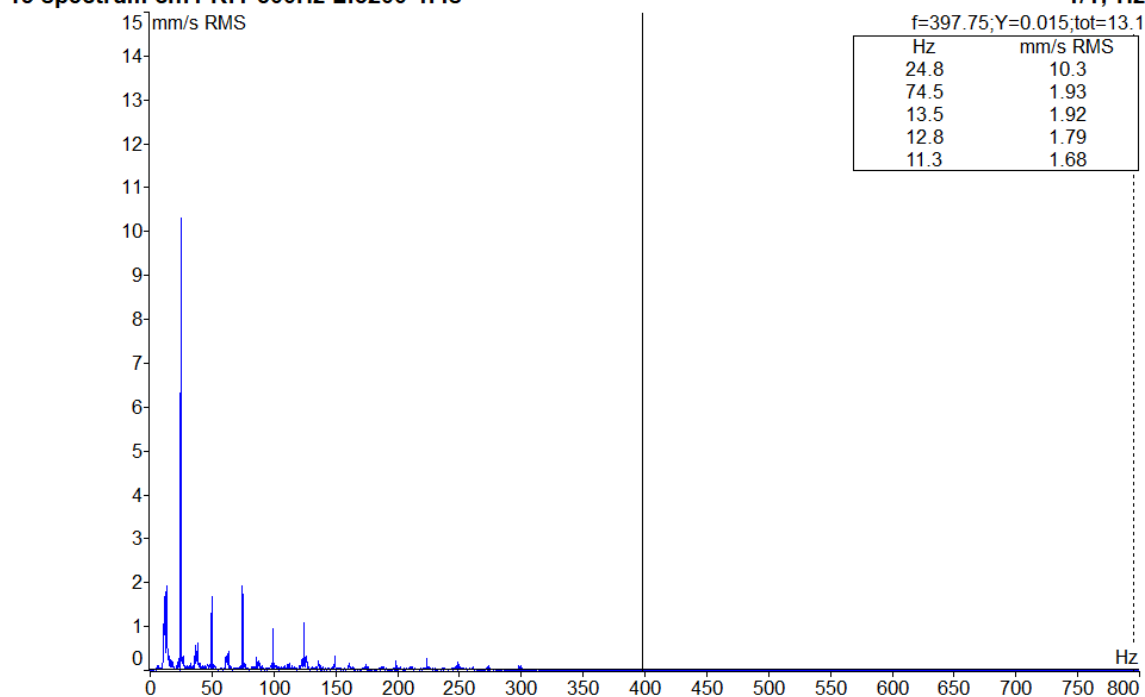
Tab. 7 — Naměřené hodnoty EXHAUSTOR 1

KOTOUC EXHAUSTOR 1 L1 - AC1 (-3.00; 3.00)g

00:00:26 / 00:00:40

13 spectrum ch:1 R:1-800Hz L:3200 T:4s

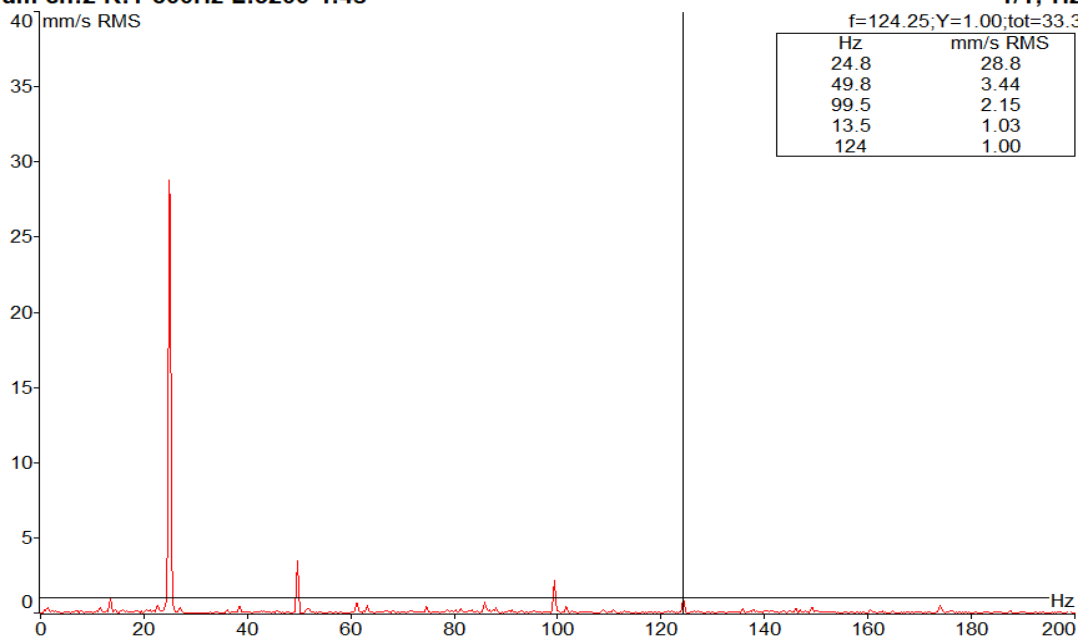
1/1;-Hz



Obrázek 28 — Spektrum rychlosti vibrací L1-V [autor]

14 spectrum ch:2 R:1-800Hz L:3200 T:4s

1/1;-Hz



Obrázek 29 — Spektrum rychlostí vibrací L4-H [autor]

**EXHAISTOR-1 - NEVYHOVUJÍCÍ technický stav**

Ložiska na motoru i na spojovacím mostě jsou v pořádku. Velké axiální rychlosti vibrací ve všech ložiskách, které už spadají do pásma D, ukazují na nesouosost nebo na ohnutý hřídel. V nevyhovujícím pásmu D jsou také L1-V, L1-H, L3-H, L4-V, L4-H. Pásmu C náleží L2-H a L3-V. Z obrázků rychlostí vibrací L1 a L4 usuzují, že se jedná o nevývahu. Celkově L4 vykazuje alarmující hodnoty, které mohou být způsobeny poruchou ventilátoru nebo špatnou konstrukcí. Na konstrukci jsem zaznamenal sváry, uvolnění a praskliny - není ideálně pevná. Termodiagnostika - bez nálezu poruchy.

• **DOPORUČENÍ** - Okamžitý zásah na vyvážení celé soustavy a co nejdříve udělat další měření na fázi ohledně nesouosti nebo ohnutého hřídele. Opravit konstrukci. Doporučuji provést kontrolu ventilátoru. Nejdříve vyvážit, pak na základě naměřených hodnot určit další postup.

## EXHAUSTOR-2



Obrázek 30 — EXHAUSTOR 2 [13]

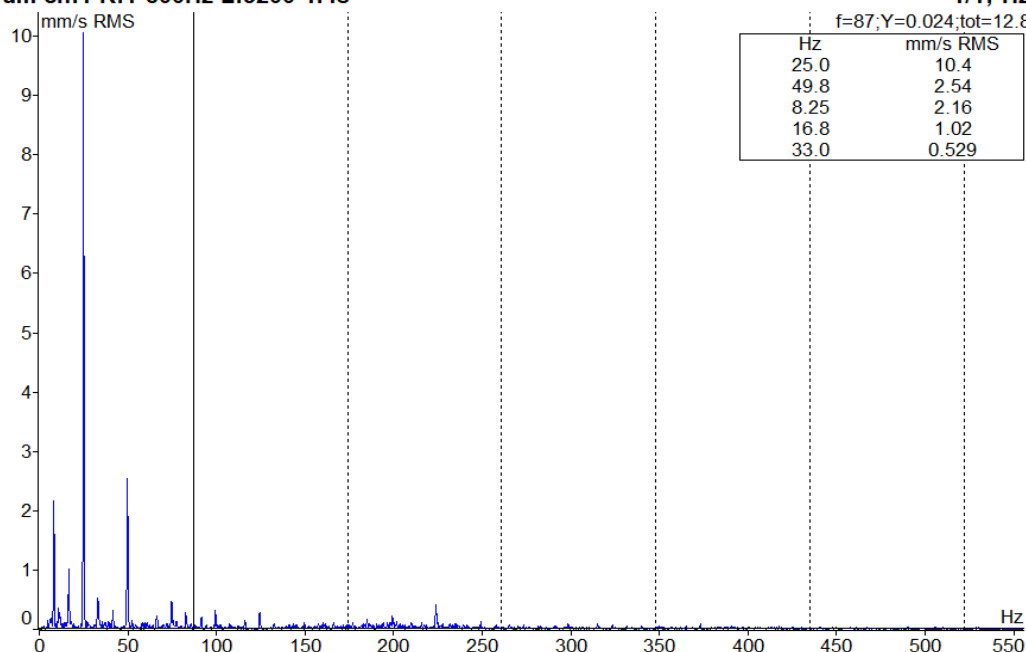
Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10 - 10000 Hz ( $v_{RMS}$ ) a efektivní hodnota zrychlení vibrací v pásmu 50 - 25600 Hz ( $a_{RMS}$ )					
EXHAUSTOR - 2		motor		spojovací most	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr				
Max ot/min		1470			
$v_{RMS}$ ( mm/s )	V	7,14	6,4	8,28	12,4
	H	6,1	2,59	6,46	11,3
	A	7,31	7,03	5,05	6,27
$a_{RMS}$ ( g ) 500 - 25600 HZ	V	1,39	0,41	0,62	2,05
	H	0,231	0,382	1,6	1,56
	A	0,365	1,32	1,07	1,91

Tab. 8 — Naměřené hodnoty EXHAUSTOR 2

13 spectrum ch:1 R:1-800Hz L:3200 T:4s

1/1;-Hz

f=87;Y=0.024;tot=12.8

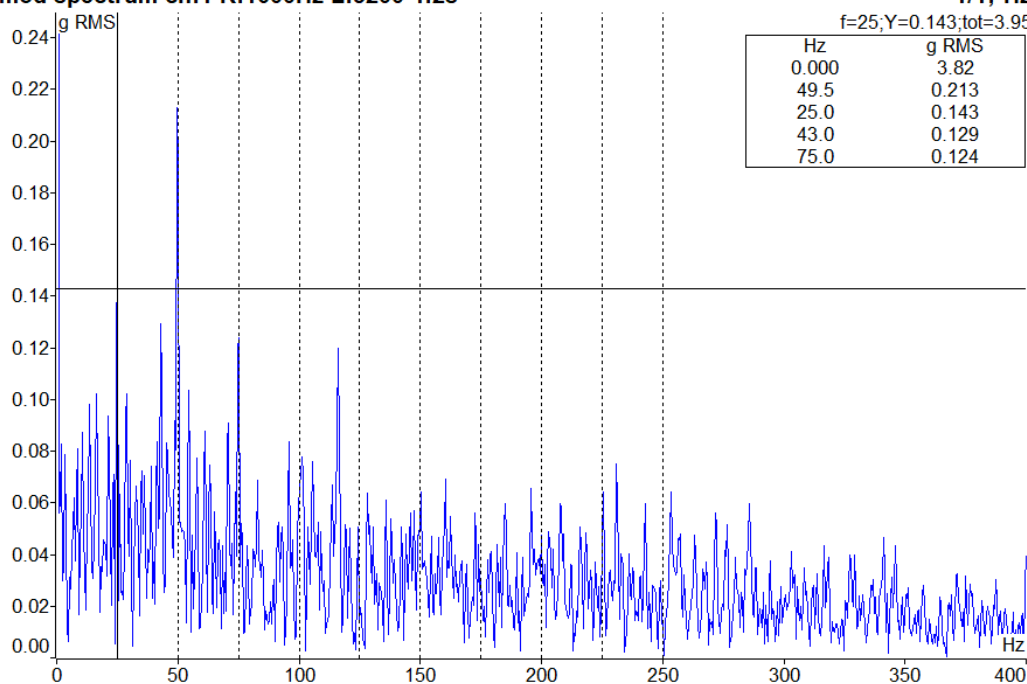


Obrázek 31 — Spektrum rychlostí vibrací L4-V [autor]

21 g-demod spectrum ch:1 R:1600Hz L:3200 T:2s

1/1;-Hz

f=25;Y=0.143;tot=3.95



Obrázek 32 — Spektrum obálky zrychlení L4 [autor]

## EXHAUSTOR-2 - ZHORŠENÝ technický stav

Motor a L3 jsou v pořádku, takže se budu zabývat pouze L4 na spojovacím mostě u ventilátoru. Rychlosti vibrací spadají do pásma C a jsou jenom na frekvencích otáček, což poukazuje na nevývahu. Vzhledem k tomu, že problémy jsou jenom na L4 je porucha pravděpodobně v ložiskovém domku. Na tento problém poukazuje také spektrum obálky zrychlení. Ze spektra zrychlení vibrací vidím, že je problém s olejem v ložisku L4. Termodiagnostika - bez nálezu poruchy.

• **DOPORUČENÍ** - Provoz je nadále možný do naplánované odstávky, ale sledovat L4 a až se dostane v oblasti rychlostí vibrací do pásma D, tak je nutný okamžitý zásah. Doporučuji výměnu ložiskového domku L4. Zkontrolovat hladinu oleje v L4 a udělat jeho tribologický rozbor.

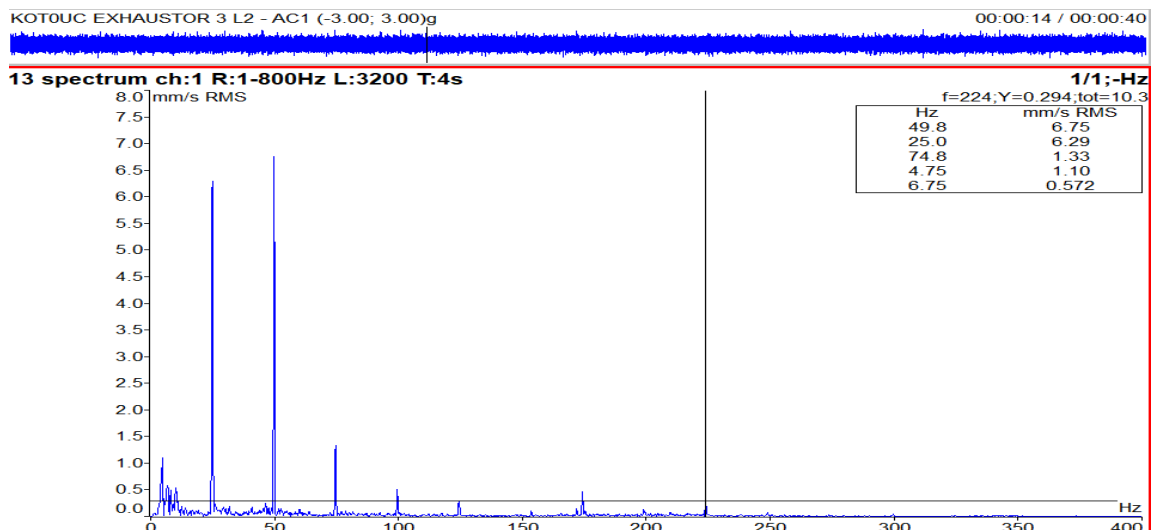
## EXHAUSTOR-3



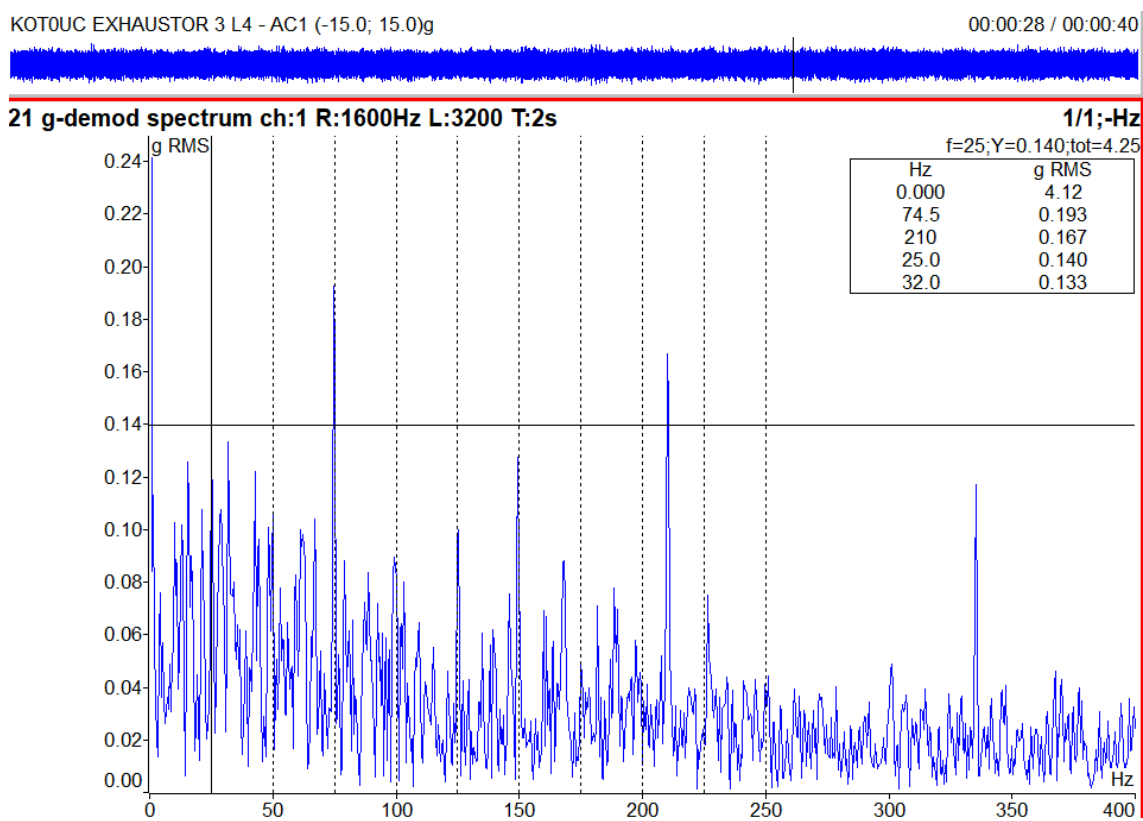
Obrázek 33 — EXHAUSTOR 3 [13]

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10 - 10000 Hz ( $v_{RMS}$ )					
a efektivní hodnota zrychlení vibrací v pásmu 50 - 25600 Hz ( $a_{RMS}$ )					
EXHAUSTOR - 3		motor		spojovací most	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr				
Max ot/min		1470			
$v_{RMS}$ ( mm/s )	V	3,84	10,4	6,04	7,64
	H	3,44	4,3	5,72	4,59
	A	3,04	5,02	6,34	6,1
$a_{RMS}$ ( g ) 500 - 25600 HZ	V	0,345	0,339	1,37	2,34
	H	0,355	0,334	1,68	1,56
	A	0,186	0,378	1,57	1,59

Tab. 9 — Naměřené hodnoty EXHAUSTOR 3

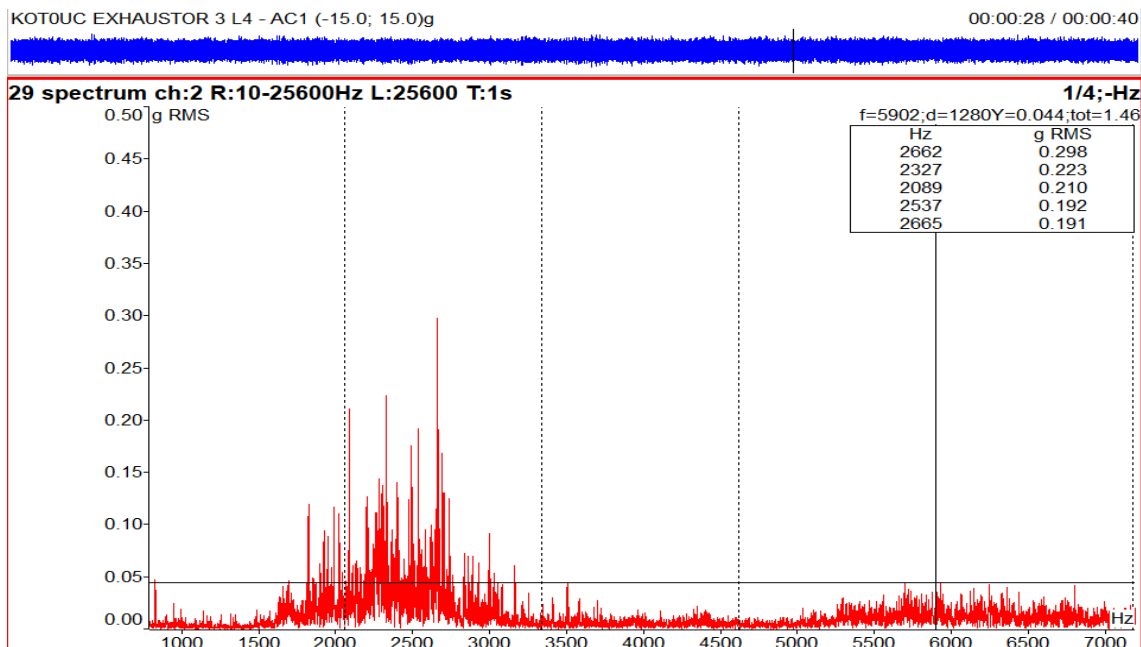


Obrázek 34 — Spektrum rychlostí vibrací L2-H [autor]



Obrázek 35 — Spektrum obálky zrychlení L4 [autor]





Obrázek 36 —Spektrum zrychlení vibrací L4 [autor]

### EXHAUSTOR-3 - ZHORŠENÝ technický stav

Ve zhoršeném pásmu C je rychlost vibrací v místě L2-V a zrychlení vibrací v místě L4-V. Rychlost vibrací v místě L2-V má větší peak na druhé ot. frekvenci - nesouosost. Spektrum obálky zrychlení L4 ukazuje na poddajnost konstrukce. Ve spektru zrychlení vibrací v oblasti 5000-7000Hz se hodnota blíží 0.05g, - problémy s olejem. Termodiagnostika - Výstraha vyšší teploty spojky, provést kontrolu na ustanovení.

- **DOPORUČENÍ** - Jsou-li hodnoty rychlosti vibrací v pásmu C můžou se používat do naplánované odstávky. Provést ustavení. L4 je v limitech rychlostí vibrací, proto doporučuji udělat kontrolu patek. Zkontrolovat hladinu oleje v L4.

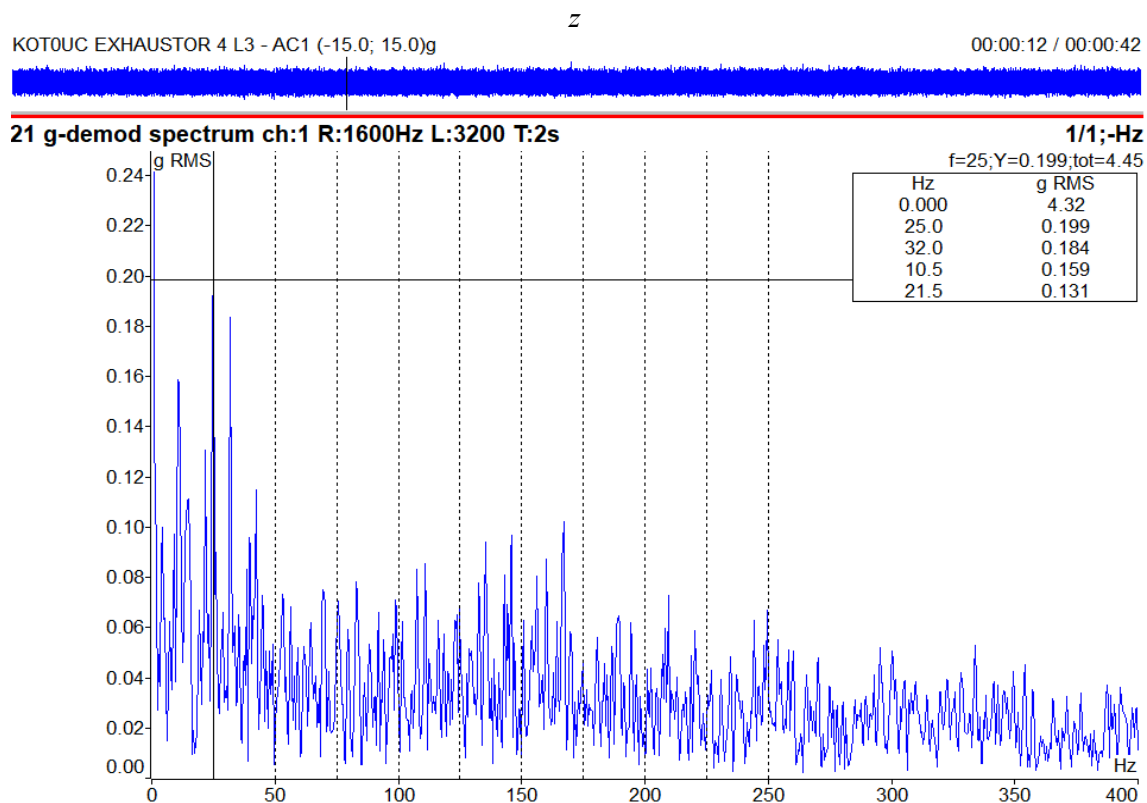
### EXHAUSTOR-4



Obrázek 37 — EXHAUSTOR 4 [13]

Tabulka efektivních hodnot rychlosti vibrací v pásmu 10 - 10000 Hz ( $v_{RMS}$ )					
a efektivní hodnota zrychlení vibrací v pásmu 50 - 25600 Hz ( $a_{RMS}$ )					
EXHAUSTOR - 4		motor		spojovací most	
Měřicí místo		L1	L2	L3	L4
Veličina	Směr				
Max ot/min		1470			
$v_{RMS}$ ( mm/s )	V	5,29	10,4	6,83	39,4
	H	6,45	5,02	14,1	23,9
	A	26,5	20,7	14,6	13,8
$a_{RMS}$ ( g ) 500 - 25600 HZ	V	0,713	1,01	2,41	2,22
	H	1,02	1,12	2,68	2,18
	A	0,956	1,13	1,31	1,07

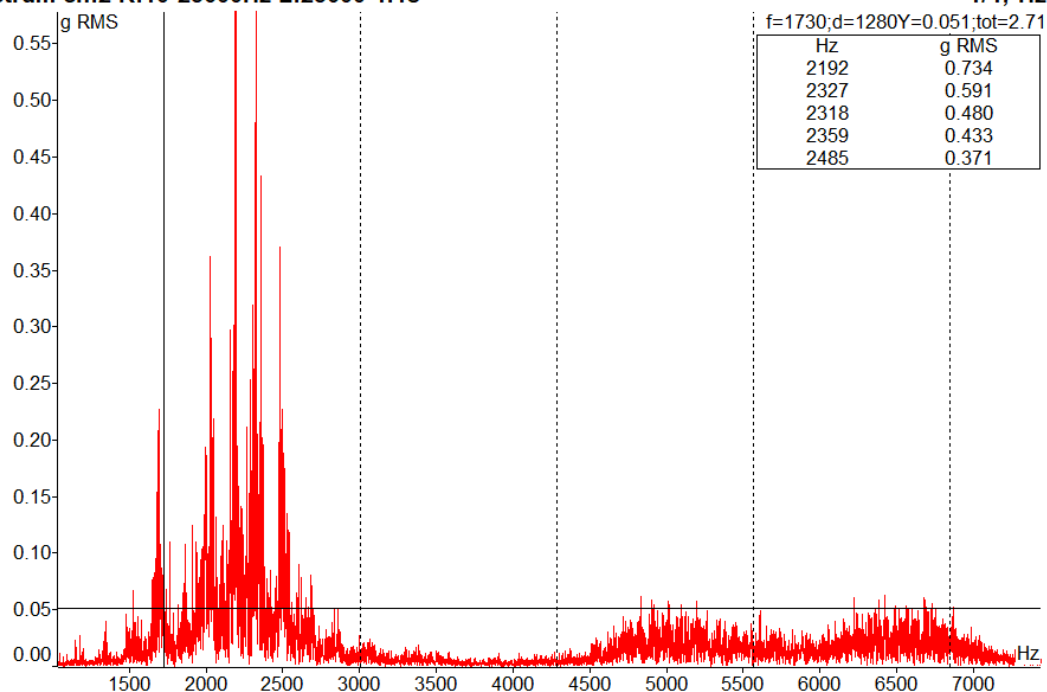
Tab. 10 — Naměřené hodnoty EXHAUSTOR 4



Obrázek 38 — Spektrum obálky zrychlení L3 [autor]

29 spectrum ch:2 R:10-25600Hz L:25600 T:1s

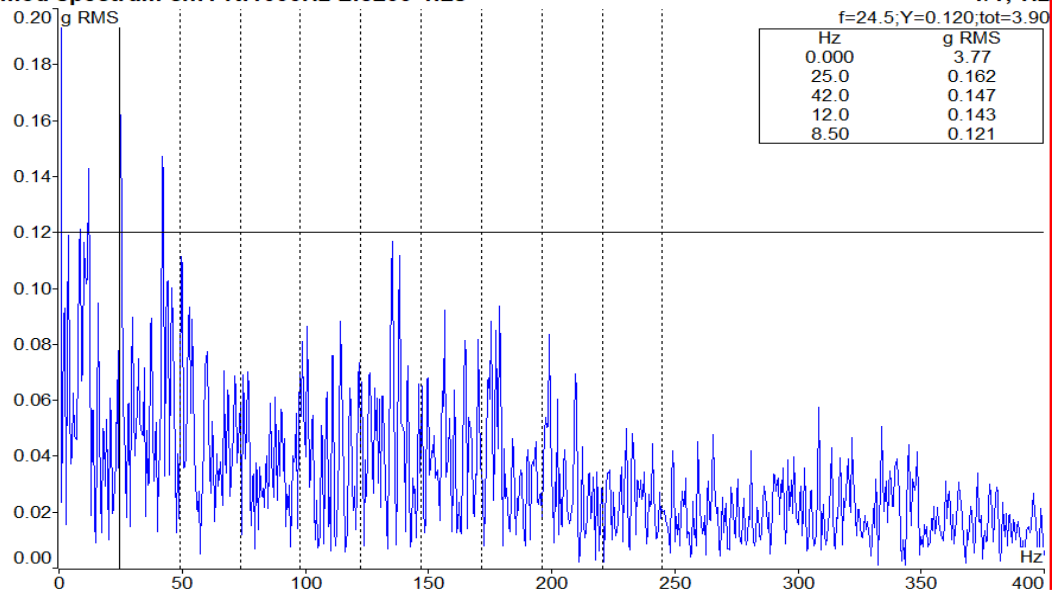
1/4;-Hz



Obrázek 39 — Spektrum zrychlení vibrací L3 [autor]

21 g-demod spectrum ch:1 R:1600Hz L:3200 T:2s

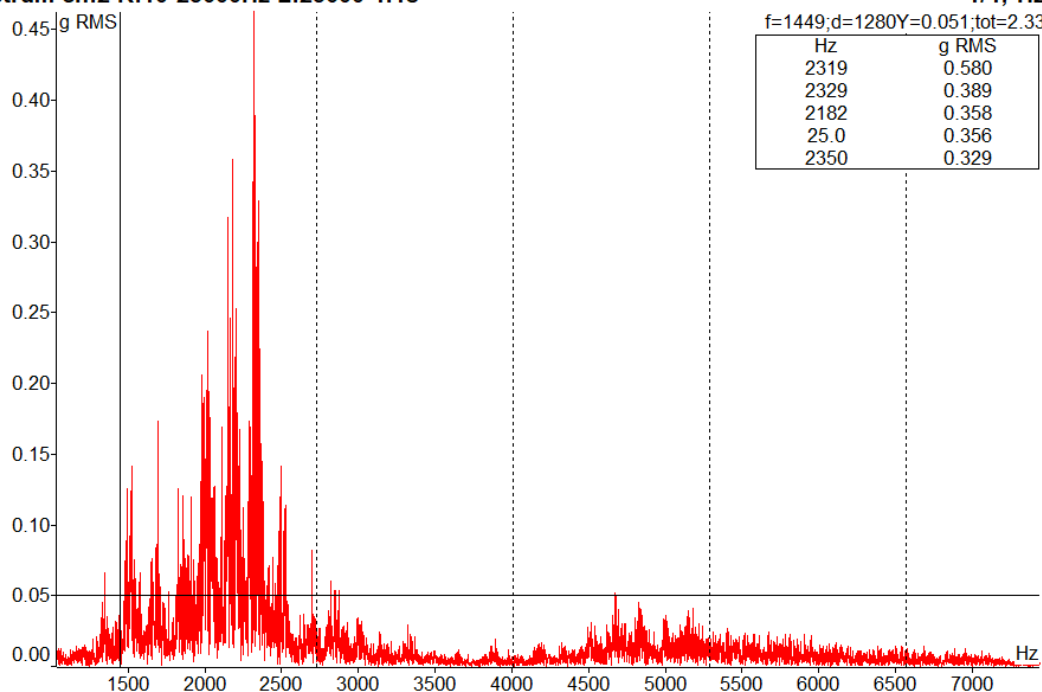
1/1;-Hz



Obrázek 40 — Spektrum obálky zrychlení L4 [autor]

29 spectrum ch:2 R:10-25600Hz L:25600 T:1s

1/4;-Hz



Obrázek 41 — Spektrum zrychlení vibrací L4 [autor]

**EXHAUSTOR-4 - NEVYHOVUJÍCÍ technický stav**

Ložiska na motoru jsou v pořádku. Velké rychlosti vibrací v axiálním směru ukazují na problémy s ustavením, aby jsem mohl vyloučit nějaké možnosti, je potřeba měřením zjistit fáze. Ze spekter obálky zrychlení ložiska je u obou ložisek L3 a L4 usuzuji, že jsou obě katastrofickém stavu. Jsou tam v obou případech poruchové frekvence, které se liší od otáčkových a celkově šum je velký. Ze spekter zrychlení vibrací ložisek L3 a L4 vidíme, že hodnoty v rozmezí 1500-3000 jsou v obou případech strašně vysoké, to ukazuje na mechanické poškození ložiska. Termodiagnostika - bez nálezu poruch.

• **DOPORUČENÍ** - Dalším měřením určit fáze. Nutný okamžitý zásah. Nejprve celou soustavu vyvážit. Ložiska L3 a L4 vyměnit. Kontrola ložiskových domku L3, L4. Další postup bych volil po naměření hodnot po vyvážení a výměně ložisek.

### 3 Souhrn stavů motorů

<b>Zařízení</b>	<b>Stav</b>
ENVEN 1	ZHORŠENÝ
ENVEN 2	ZHORŠENÝ
ENVEN 3	NEVYHOVUJÍCÍ
ENVEN 4	NEVYHOVUJÍCÍ
EXHAUSTOR 1	NEVYHOVUJÍCÍ
EXHAUSTOR 2	ZHORŠENÝ
EXHAUSTOR 3	ZHORŠENÝ
EXHAUSTOR 4	NEVYHOVUJÍCÍ

Tab. 11 — Stavy zkoumaných motorů

## **Závěr**

Cílem této bakalářské práce bylo naučit se aplikovat jednotlivé metody vibrodiagnostiky a správně je následně vyhodnotit. Mrzí mě, že jsem si nemohl ověřit správnost výsledků pomocí dalších měření, která nebyla možná v rámci nouzového stavu vyhlášeného vládou České Republiky. V této práci jsem se naučil pracovat s výsledky měření a jejich vyhodnocování na základě naměřených hodnot a jednotlivých spekter vibrací.

První část mé bakalářské práce je zaměřená na teorii diagnostiky se zaměřením na vibrodiagnostiku. Rozvádím zde jednotlivé poruchy, způsob jak je správně detekovat a jejich následné řešení.

Druhá (praktická) část mé práce je zaměřena na konkrétní problémy. Hodnotil jsem stav 8 strojů firmy Kotouč Štramberk – LB Cemix, s.r.o. a prováděl jsem jejich diagnostiku. Ta se skládala z posouzení naměřených hodnot, určení příčin vibrací a následného návrhu řešení. Na konci jsem napsal své hodnocení. Na základě zvoleného hodnocení jsem na konci této práce navrhnul následná řešení jak situaci řešit. Do rozhodování jsem začlenil také termodynamický posudek na tyto stroje.

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Janu Blatovi za vstřícnost, odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce. Chtěl bych poděkovat společnosti Kotouč Štramberk – LB Cemix, s.r.o. za vstřícnost, ochotu a možnost uskutečnění měření v provozu. Dále chci poděkovat rodině a svým kamarádům z VŠB za podporu a trpělivost. V neposlední řadě chci poděkovat Radimovi Švajnochovi, Adamovi Frankovi a Jiřímu Vojtíškovi za odbornou pomoc při tvorbě této bakalářské práce.

---

## Použitá literatura

- [1] HELEBRANT, František. Technická diagnostika a spolehlivost. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1690-6.
- [2] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. Technická diagnostika a spolehlivost. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0650-9.
- [3] BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej : teorie a praktyka. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.
- [4] BLATA, Jan. Manuál pro výuku: Vibrodiagnostika strojních zařízení. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. 24 s.
- [5] PROVOZ, DIAGNOSTIKA A ÚDRŽBA STROJŮ [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: [http://www.340.vsb.cz/doc/cms\\_library/provoz-diagnostika-audrzba-stroju-189.pdf](http://www.340.vsb.cz/doc/cms_library/provoz-diagnostika-audrzba-stroju-189.pdf)
- [6] ADASH [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://adash.com/documents/A4400/Adash-A4400-VA4-Pro-manual-cz.pdf>
- [7] ČSN ISO 690 Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.
- [8] Aplikace metod technické diagnostiky na vybraných zařízeních [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/136948/RAD0060\\_FS\\_B2341\\_2301R023\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/136948/RAD0060_FS_B2341_2301R023_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Jan Blata Ph.D.
- [9] Vibrační diagnostika trakčního motoru ve zkušebně [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/88080>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Jan Blata Ph.D.
- [10] BERRY. Ilustrovaná tabulka pro diagnostiku vibrací: dle Berryho. Ostrava: Oborová práce, 2008. Technical associates of Charlotte. P. C. R-0894-4.
- [11] Vyvažování rotorů. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Vyva%C5%BEov%C3%A1n%C3%AD\\_rotor%C5%AF](https://cs.wikipedia.org/wiki/Vyva%C5%BEov%C3%A1n%C3%AD_rotor%C5%AF)
- [12] In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Vyva%C5%BEovac%C3%AD\\_stroj](https://cs.wikipedia.org/wiki/Vyva%C5%BEovac%C3%AD_stroj).
- [13] Technická diagnostika pro firmu LB Cemix Štrambersk. BLATA, Jan. Technická diagnostika: Termodiagnostické měření [online]. 2019, s. 16 [cit. 2020-05-16].



- 
- [14] Technická zpráva z vibrodiagnostického měření [online]. BLATA, Jan. 2015, s. 24 [cit. 2020-05-16].
- [15] HRABEC, Ladislav; HELEBRANT, František; MAZALOVÁ, Jana. TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA III : Ustavování strojů. Ostrava : VŠB - TU Ostrava, FS, 2007. 91 s
- [16] BLATA PH.D, Ing. Jan. METODY TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY [online]. 2010, 2010/2011, 27 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2735-3.pdf>

---

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
<b>a</b>	[ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]	zrychlení
<b>f</b>	[ Hz ]	frekvence
<b>T</b>	[ $\text{Hz}^{-1}$ ]	perioda
<b>sin</b>	[ - ]	goniometrická fkce sinus
<b>cos</b>	[ - ]	goniometrická fkce kosinus
<b>t</b>	[ s ]	čas
<b>v</b>	[ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	rychlost
<b>g</b>	[ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ ]	gravitační zrychlení
<b>c</b>	[ - ]	počet valivých elementů
<b><math>\pi</math></b>	[ - ]	Ludonfovo číslo
<b><math>\alpha</math></b>	[ $^{\circ}$ ]	úhel
<b><math>\omega</math></b>	[ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	úhlová rychlost
<b>dv</b>	[ - ]	derivace rychlosti
<b>dt</b>	[ - ]	derivace času
<b><math>X_{ave}</math></b>	[ - ]	průměrná hodnota
<b><math>X_{MAX}</math></b>	[ - ]	špička (peak)
<b>X</b>	[ - ]	okamžitá výchylka
<b><math>d_0</math></b>	[ mm ]	průměr valivého elementu
<b><math>d_s</math></b>	[ mm ]	střední průměr ložiska
<b>D</b>	[ mm ]	vnější průměr ložiska
<b>d</b>	[ mm ]	vnitřní průměr ložiska

---

---

## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
<b>apod.</b>	a podobně
<b>atd.</b>	a tak dále
<b>č.</b>	číslo
<b>max.</b>	maximální
<b>např.</b>	například
<b>tzn.</b>	to znamená
<b>tzv.</b>	tak zvaný
<b>viz</b>	je rozkazovací způsob od slovesa vidět
<b>VŠB-TUO</b>	Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
<b>IR</b>	infrared - infračervená
<b>ele.</b>	elektrický
<b>tab.</b>	tabulka
<b>ot.</b>	otáčky
<b>tj.</b>	to je
<b>fkce</b>	funkce
<b>č.p.</b>	číslo popisné

---

---

## Seznam použitých cizojazyčných zkratek

Zkratka	Význam
<b>BPFI</b>	Ball Passing Frequency Inner Race ( Frekvence kmitání způsobená poškozením vnitřního kroužku )
<b>BPFO</b>	Ball Passing Frequency Outer Race ( Frekvence kmitání způsobená poškozením vnějšího kroužku )
<b>BSP</b>	Ball Spin Frequency ( Frekvence kmitání způsobená poškozením valivého elementu )
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transformation ( Rychlá Fourierova transformace )
<b>RMS</b>	Root Mean Square ( Efektivní hodnota )
<b>RPM</b>	Revolution Per Minute ( otáčky za minutu )

---

---

## Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 — Základní vztahové rovnice a časový průběh výchylky, rychlosti a zrychlení[9]-	11 -
Obrázek 2 — Harmonický časový signál [9].....	12 -
Obrázek 3 — Transformace signálu [9] .....	13 -
Obrázek 4 — Frekvenční spektrum zrychlení vibrací [9].....	14 -
Obrázek 5 — Umístění snímačů [16] .....	15 -
Obrázek 6 — Vyvažovací přístroj [12] .....	18 -
Obrázek 7 — Náčrt rozměrů valivého ložiska [9] .....	20 -
Obrázek 8 — Základní druhy nesouososti.....	21 -
Obrázek 9 — Paralelní nesouosost, projevy ve spektru [10] .....	21 -
Obrázek 10 — Úhlová nesouosost, projevy ve spektru [10].....	21 -
Obrázek 11 — Nesouosé ložisko, projevy ve spektru[10].....	22 -
Obrázek 12 — Přístroj na měření vibrací ADASH VA4 PRO [6].....	24 -
Obrázek 13 — Pohled na měřené směry vibrací a měřící místa [8].....	27 -
Obrázek 14 — Zařízení ENVEN 1 [13] .....	28 -
Obrázek 15 — Spektrum rychlostí vibrací L3-V [autor] .....	29 -
Obrázek 16 — Spektrum zrychlení vibrací L4 [autor] .....	29 -
Obrázek 17 — ENVEN 2 [13] .....	30 -
Obrázek 18 — Spektrum rychlostí vibrací L2 [autor] .....	31 -
Obrázek 19 — Spektrum zrychlení vibrací L4 [autor] .....	32 -
Obrázek 20 — ENVEN 3 a termosnímek [13] .....	33 -
Obrázek 21 — Spektrum rychlostí vibrací L4-V [autor] .....	34 -
Obrázek 22 — Spektrum zrychlení vibrací L3 [autor] .....	34 -
Obrázek 23 — Spektrum obálky zrychlení L4 [autor].....	35 -
Obrázek 24 — ENVEN 4 [13] .....	36 -
Obrázek 25 — Spektrum rychlostí vibrací L3-H [autor] .....	37 -
Obrázek 26 — Spektrum rychlostí vibrací L4-V [autor] .....	37 -
Obrázek 27 — EXHAUSTOR 1 [13].....	38 -
Obrázek 28 — Spektrum rychlostí vibrací L1-V [autor] .....	39 -
Obrázek 29 — Spektrum rychlostí vibrací L4-H [autor] .....	40 -

---

Obrázek 30 — EXHAUSTOR 2 [13].....	- 41 -
Obrázek 31 — Spektrum rychlostí vibrací L4-V [autor] .....	- 42 -
Obrázek 32 — Spektrum obálky zrychlení L4 [autor].....	- 42 -
Obrázek 33 — EXHAUSTOR 3 [13].....	- 43 -
Obrázek 34 — Spektrum rychlostí vibrací L2-H [autor] .....	- 44 -
Obrázek 35 — Spektrum obálky zrychlení L4 [autor].....	- 44 -
Obrázek 36 — Spektrum zrychlení vibrací L4 [autor] .....	- 45 -
Obrázek 37 — EXHAUSTOR 4 [13].....	- 45 -
Obrázek 38 — Spektrum obálky zrychlení L3 [autor].....	- 46 -
Obrázek 39 — Spektrum zrychlení vibrací L3 [autor] .....	- 47 -
Obrázek 40 — Spektrum obálky zrychlení L4 [autor].....	- 47 -
Obrázek 41 — Spektrum zrychlení vibrací L4 [autor] .....	- 48 -
Tab. 1 — Doporučené hodnoty pro zrychlení vibrací v pásmu 500-25000 Hz [14] .....	- 25 -
Tab. 2 — Doporučené hodnoty pro rychlost vibrací v pásmu 10-10000 Hz[14] .....	- 26 -
Tab. 3 — Naměřené hodnoty ENVEN 1 .....	- 28 -
Tab. 4 — Naměřené hodnoty ENVEN 2 .....	- 31 -
Tab. 5 — Naměřené hodnoty ENVEN 3 .....	- 33 -
Tab. 6 — Naměřené hodnoty ENVEN 4 .....	- 36 -
Tab. 7 — Naměřené hodnoty EXHAUSTOR 1 .....	- 39 -
Tab. 8 — Naměřené hodnoty EXHAUSTOR 2 .....	- 41 -
Tab. 9 — Naměřené hodnoty EXHAUSTOR 3 .....	- 43 -
Tab. 10 — Naměřené hodnoty EXHAUSTOR 4.....	- 46 -
Tab. 11 — Stavy zkoumaných motorů.....	- 49 -

---